bfg Bundesanstalt für Gewässerkunde

2/2008

Hydrologische Wissenschaften
Fachgemeinschaft in der DWA

Veranstaltungen

Hydrologie und Wasserbewirtschaftung
Hauptausschuss der DWA

Ultraschall in der Hydrometrie: neue Technik – neuer Nutzen!?

Seminar am 3./4. Juni 2008 in Koblenz

Koblenz, April 2008

Impressum

Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: (0261) 1306-0
Fax: (0261) 1306 5302
e-mail: posteingang@bafg.de
Internet: http://www.bafg.de

Druck: Druckpartner Moser, Druck + Verlag GmbH, Rheinbach

ISSN 1866 – 220X

Inhaltsverzeichnis

Physikalische Randbedingungen stationärer Systeme zur Durchflussmessung 5
Jürgen Skripalle

Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen in Baden-Württemberg 15
Manfred Juraschek

Durchflussmessanlage Wireless. Entwicklung einer kabellosen Laufzeit-Messmethode.....22
Peter Franke und Wolfgang Frey

Durchflussbestimmung bei größeren Geometrien mit Ultraschall. Kreuzkorrealionsverfahren 29
Michale Teufel

OTT ADC – modernste Strömungsmesstechnik für die klassische Durchflussmessung nach dem Lotrechtenverfahren 38
Stefan Siedschlag

Mehrpfad-Ultraschalllaufzeitmessung in natürlichen Fließgewässern.....45
Sebastian Fischer

A Commercial Multi-Frequency Acoustic Backscatter Instrument for Profiling of Suspended Sediment Size Distribution and Load 47
Andrew M. Smerdon

On the use of horizontal ADCPs for discharge and sediment transport monitoring 56
Pim van Santen, Jeroen Aardoom, Peter Meijer

Untersuchungen zur Verdriftung von Baggergut mit ADCP auf einer Klappstelle vor Rügen 65
Christian Maushake

Detaillierte Einblicke in die ästuarine Schwebstoffdynamik mittels hochauflösender Hydroakustik.....75
Kerstin Schrottke und Alexander Bartholomä

Bodennahe Turbulenzmessungen im Labor und Feld.....84
Alexander Bartholomä und Martina Karle

Ultraschall-Strömungsmessungen für Funktionskontrollen von Fischwanderhilfen.....90
Carsten Wirtz

Großflächige Geschwindigkeitsaufnahmen mittels ADCP – Durchführung und Möglichkeiten.....96
Roland Schmid und Harald Niesler

ADCP-Messungen an einem voralpinen Gewässer mit erheblichem Schwebstoff- und Geschiebetransport 108
Katharina Fiedler

Software TIDE – Analyse von ADCP-Messungen in Tideflüssen 119
Matthias Adler und Uwe Nicodemus

Seminar
Ultraschall in der Hydrometrie: neue Technik – neuer Nutzen!?

Inhalt

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde und die Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA veranstalten dieses Seminar zum Thema Ultraschalltechnik in der Hydrometrie. Es bietet Anwendern und Herstellern von Ultraschallgeräten ein gemeinsames Forum und knüpft an das Seminar „Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik“ vom September 2005 an.

Der thematische Rahmen umfasst diesmal neben Ultraschall-Doppler Geräten auch Anlagen und Sensoren, die nach dem Laufzeit- oder Korrelationsverfahren arbeiten. Hersteller haben die Gelegenheit, ihre Produkte in Vorträgen und auf Firmenständen zu präsentieren.

Im Vordergrund des Seminars steht die Anwendung der Ultraschalltechnik mit Beiträgen sowohl aus der Forschung als auch aus dem gewässerkundlichen Routinebetrieb. Der Titel des Seminars „Ultraschall in der Hydrometrie: neue Technik - neuer Nutzen!?“ soll auch dazu ermuntern, neben den neuen Möglichkeiten innovativer Technik Probleme im praktischen Betrieb und Grenzen der Einsetzbarkeit aufzuzeigen.

Veranstalter

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)
Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften (FgHW)
AG „Hydrometrie“ im Hauptausschuss „Hydrologie und Wasserbewirtschaftung“ der DWA

Physikalische Randbedingungen stationärer Systeme zur Durchflussmessung

Jürgen Skripalle

1 Einleitung

Stationäre Ultraschallanlagen werden seit mehr als 30 Jahren im Bereich der Hydrometrie eingesetzt. Anfänglich wurden Systeme installiert, die nach der Methode der Laufzeitdifferenz arbeiten. Seit etwa 15 Jahren werden auch Geräte verwendet, die den Dopplereffekt ausnutzen. Bei dieser Gerätefamilie unterscheidet man zwischen der sogenannten Moving-Boat-Methode und horizontal arbeitenden, stationären Systemen (H-ADCP). Insgesamt wurden in der Vergangenheit erhebliche Fortschritte in der Güte der Messungen erzielt. Dies ist zum einen auf die Verwendung von immer schnelleren Signalprozessoren und auf die Möglichkeit, immer komplexere Algorithmen im System selbst implementieren zu können, zurückzuführen. Die Praxis hat aber auch gezeigt, dass es trotz modernster Technik Anwendungsgrenzen gibt, bei der die Ultraschallmesstechnik falsche oder überhaupt keine Ergebnisse liefert. Diese Grenzen sind physikalischer Natur und wurden erst mit einer Vielzahl von Installationen erarbeitet. Heute sind es bekannte Randbedingungen, die den Einsatz von Ultraschall in einem Gewässer definieren.

2 Grundlagen Ultraschall

Werden in einem elastischen Medium einzelne Teilchen periodisch aus ihrer Ruhelage heraus bewegt, so kommt es zu einer Dichte- und Druckveränderung, die sich aufgrund der Koppelung mit benachbarten Teilchen als kontinuierliche elastische Welle fortpflanzt. Diese Druckwelle wird als Schallwelle bezeichnet. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle nennt man Schallgeschwindigkeit. In Abhängigkeit von der Frequenz, mit der die Teilchen um ihre Ruhelage schwingen, unterscheidet man verschiedene Schallbereiche, wobei als Ultraschall die nicht mehr mit dem menschlichen Gehör wahrnehmbaren Schallwellen großer Frequenzen bezeichnet werden.

Tabelle 1
Frequenzbereiche in der Akustik

Frequenzbereiche	Gebiet der Akustik
0 < f < 20 Hz	Infraschall
16 kHz < f < 20 kHz	Hörschall
16 kHz < f < 1 GHz	**Ultraschall**
> 500 MHz	Hyperschall

2.1 Ultraschallerzeugung

Grundlage für die praktische Erzeugung von Ultraschall in einem Gewässer ist der piezoelektrische Effekt, der im 19. Jahrhundert am Quarz entdeckt wurde. Wird ein aus einem natürlichen Quarzkristall herausgeschliffenes Plättchen mechanisch zusammengepresst oder gedehnt, so entstehen an seiner Oberfläche elektrische Ladungen, die bei Metallisierung dieser Oberflächen gesammelt und als elektrische Spannung gemessen und weiterverarbeitet werden können. Dieser Effekt ist umkehrbar, legt man eine elektrische Spannung an die metallisierte Oberflächen an, so zieht sich der Kristall in Abhängigkeit von der Polarität der Spannung zusammen oder dehnt sich aus. Der gleiche Kristall kann somit sowohl Ultraschallsignale senden als auch empfangen.

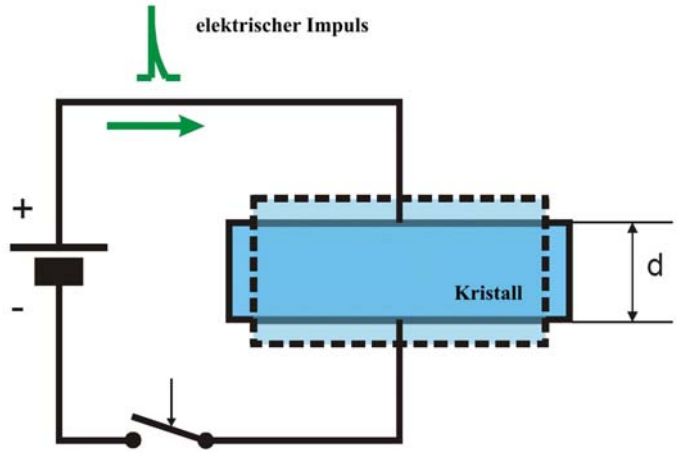


Abb. 1: Piezoelektrischer Effekt

Zur Erzeugung einer Schallkeule werden vorzugsweise mehrere Kristalle in Gruppen angeordnet und in einem Gehäuse zu einem „Wandler“ vergossen. Bei der Schallabstrahlung ergibt sich die Verteilung des Schalldruckes im Raum vor dem Wandler als Überlagerung der von den einzelnen Kristallen ausgehenden Kugelwellen. Hierbei entsteht ein Interferenzfeld mit Gebieten größeren und geringeren Druckes. Ab einer gewissen Entfernung bildet sich ein Kugelwellentyp heraus, bei dem die winkelabhängige Druckverteilung entfernungsunabhängig wird. In dieser Richtung ist der Druck am größten, das Schallfeld wird Hauptkeule genannt. Die winkelabhängige auf die Hauptrichtung normierte Druckverteilung bezeichnet man als Richtcharakteristik. Die Verteilung des Schalldruckes im Gewässer hat die Gestalt einer dreidimensionalen, rotationssymmetrischen Struktur.

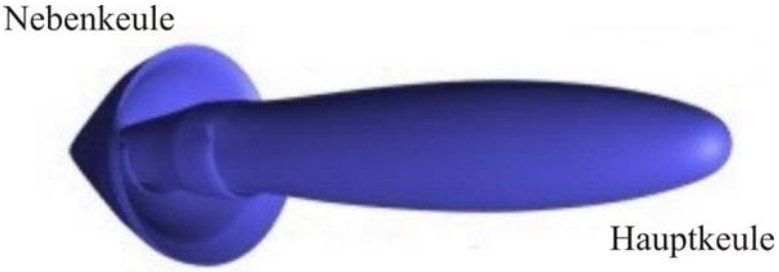


Abb. 2: Räumliche Darstellung der Richtcharakteristik

Die Darstellung in der Zeichenebene wird fast immer als ebener Schnitt durch die dreidimensionale Struktur ausgeführt. Bei rotationssymmetrischen Richtcharakteristiken legt man den Schnitt durch die Symmetrieachse und kann damit die Form der Druckverteilung vollständig darstellen. Ein Maß für den Grad der Intensitätsbündelung ist die Breite der Hauptstrahlrichtung. Derjenige Winkel, bei dem die Intensität auf die Hälfte (-3 dB) des Wertes der Hauptrichtung (0 dB) abgefallen ist, bezeichnet man als Öffnungswinkel.

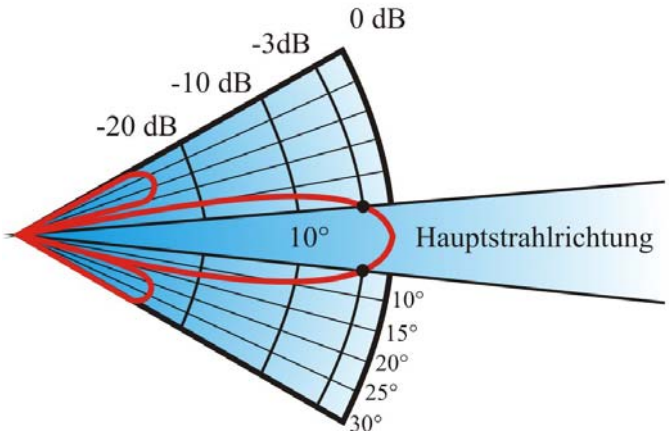


Abb. 3: Darstellung der Richtcharakteristik in Polarkoordinaten als Schnitt durch die Symmetrieachse. Illustration des Öffnungswinkels und einiger Kenngrößen

3 Schallausbreitung in einem Gewässer

Die Ausbreitung akustischer Wellen in einem Gewässer ist ein komplizierter Vorgang, der vor allem durch die ungleichmäßige Verteilung der Schallgeschwindigkeit verursacht wird. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich hauptsächlich mit der Temperatur, dem Salzgehalt und der Tiefe. Weil Salzgehalt und Temperatur auch zu Dichteänderungen führen, können die Schallwellen zur Gewässersohle oder zur Wasseroberfläche hin abgelenkt werden. Aber auch Reflexionen des akustischen Signals am Wasserspiegel oder an der Gewässersohle beeinträchtigen den Schallstrahl.

3.1 Temperatur und Salz

Temperaturänderungen sind dort von Bedeutung, wo durch Kühlwassereinläufe erheblich wärmeres Wasser in einen Fluss eingeleitet wird, wo Wasser aus einem Kraftwerkskanal und das aus dem natürlichen Flusslauf wieder zusammenfließen, wo Wasser aus einem Altarm mit demjenigen aus dem begradigten Flusslauf zusammenströmt, wo durch Tiefenentnahme aus einem Staudamm Wasser mit dem natürlichen Durchfluss vermischt wird oder wo im Bereich der Mündung See- und Flusswasser mit unterschiedlichen Temperaturen aufeinandertreffen. Salzgehaltgradienten haben einen ähnlichen Einfluss. Da diese Effekte nur bei Flüssen im Tidegebiet oder bei der Einleitung großer salzhaltiger Volumenströme auftreten, ist diese Störung bei Installationen in Binnengewässern nicht sehr verbreitet.

Die physikalischen Vorgänge bei einem vertikalen Dichteunterschied, also der Änderung der Dichte über die Wassertiefe und die damit verbundene Ablenkung des Schallstrahls, werden exemplarisch an einer Laufzeitdifferenzanlage erläutert. Da die Schallgeschwindigkeit im Bereich mit wärmerem Wasser höher ist, wird der Schallstrahl zur Wasseroberfläche hin gebeugt, am Wasserspiegel reflektiert und läuft dann wieder in den tieferen Bereich zurück. Die einzelnen Druckwellen überlagern sich dabei. In der Phase gegenläufige Druckwellen löschen sich aus, in der Phase gleiche Druckwellen verstärken das Signal (Superposition). Während das ursprünglich direkte Signal das gegenüberliegende Ufer überhaupt nicht mehr erreicht, wird am Empfänger nur noch ein abgeschwächtes und durch Superpositionen gekennzeichnetes Signal empfangen. Zwar können diese Signale noch messtechnisch erfasst werden, jedoch stellen sie prinzipiell hohe Anforderungen an die Signalerkennung, was nur mit Geräten der neuesten Generation zu realisieren ist.

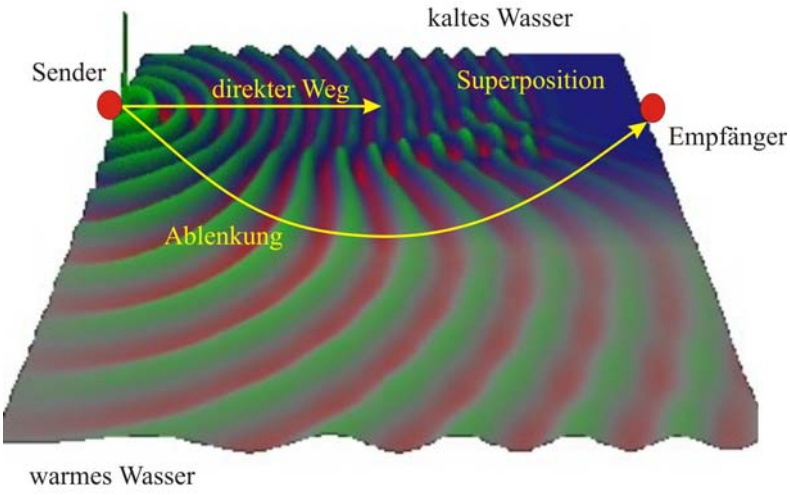


Abb. 4: Strahlablenkung eines Laufzeitdifferenz-Systems infolge einer Änderung der Temperatur oder des Salzgehaltes über die Wassertiefe

Auch horizontale Dichteunterschiede wirken sich entsprechend aus, was am Beispiel eines H-ADCPs illustriert wird. Die horizontale Keule (nur eine Keule ist hier dargestellt) wird umso mehr abgelenkt, je weiter diese in das Gewässer hineinreicht. Die für den Dopplereffekt wichtige Rückstreuung des Signals an einem mitschwimmenden Partikel kommt dann aber aus einer Zelle, die im Gewässer nicht an der gedachten Position ist. Vielmehr werden dann Echos einer Zelle zugeordnet, die auf irgendeine Art und Weise den Empfänger erreichen und genau in dem über die theoretische Laufzeit berechneten Messfenster für eine Messzelle liegen. Kommt überhaupt kein auswertbares Echo zurück, fallen die entfernter liegenden Messzellen aus und der Durchfluss kann nur noch aus Fließgeschwindigkeiten ermittelt werden, die in relativ nahen Messzellen aufgenommen wurden. Die Messgüte bei einem H-ADCP sollte daher auch immer anhand der Echointensität beurteilt werden. Diese sollte immer monoton fallend sein, da die Schallenergie mit der Entfernung abnimmt. Ein Anstieg der Echointensität deutet darauf hin, dass das rückgestreute Signal nicht von einem Partikel herrührt, sondern vielmehr auf einer Reflexion z. B. von der Gewässersohle beruht.

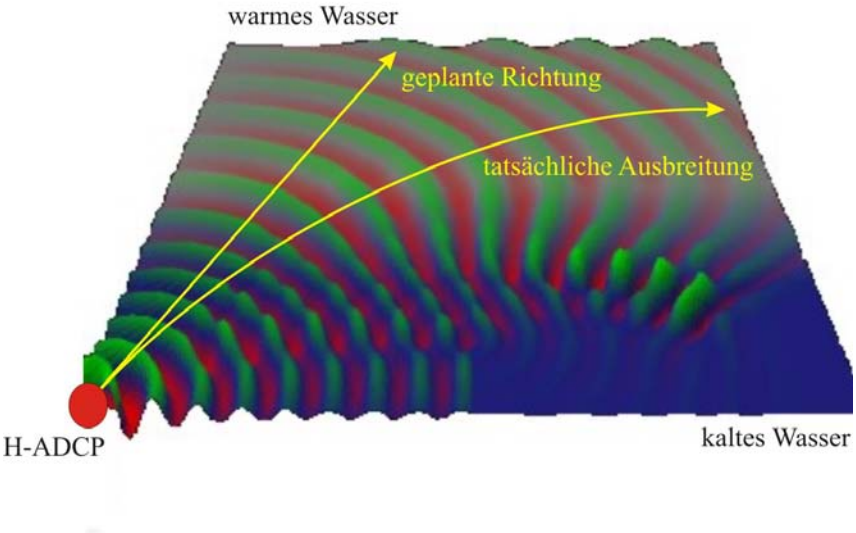


Abb. 5: Strahlablenkung eines H-ADCPs infolge einer Änderung der Temperatur oder des Salzgehaltes über die Gewässerbreite

4 Reflexion und Streuung in einem Gewässer

An den natürlichen Grenzflächen des Gewässers werden die Schallwellen reflektiert, gebrochen und gestreut. Bei der Streuung unterscheidet man Vorwärtsstreuung in Richtung der Spielgelreflexion und Rückwärtsstreuung in Richtung des Senders. Die von den einzelnen Grenzflächen zurückgestrahlte Schallenergie hängt von deren Beschaffenheit und Größe ab. Während diese Reflexionen bei der Laufzeitdifferenz-Methode nur bei älteren Systemen mit analoger Signalverarbeitung von Bedeutung sind, sind sie bei einem H-ADCP die alles entscheidende Größe.

4.1 Spiegelreflexion an der Wasseroberfläche bei der Laufzeitdifferenz-Methode

Eine kugelförmige Schallwelle in der Nähe der Wasseroberfläche erzeugt ein Spiegelbild an der Wasseroberfläche. Voraussetzung ist, dass die Rauigkeit der Oberfläche klein gegenüber der Wellenlänge ist, also nur kleine Oberflächenwellen existieren. Die Reflexion an der Wasseroberfläche bewirkt einen Phasensprung von 180°. Schwierigkeiten treten dann auf, wenn das reflektierte Signal mit dem direkten Signal interferiert, da durch die Superposition der Signale die ersten Schwingungen des Empfangssignals ausgelöscht werden können. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Empfangselektronik die Signale analog verarbeitet und mithilfe eines Schwellwertes die Laufzeit ermittelt. Modernere Systeme arbeiten dagegen mit codierten Signalen und mit Hilfe von Korrelationsfunktionen, bei denen das empfangene Signal mit einem im Speicher abgelegten Signal bildhaft verglichen wird. Eventuell auftretende Superpositionen oder Änderungen in der Frequenz können damit erkannt und korrigiert werden.

4.2 Reflexionen an der Gewässersohle bei der Doppler-Methode

Die Gewässersohle reflektiert und streut vorwiegend Schallenergie. Dabei sind die Reflexionen um ein Vielfaches größer als die durch die Schwebstoffpartikel rückgestreute Schallenergie. Die Empfangselektronik von Dopplersystemen ist daher vor dem Empfang dieser starken Signale zu schützen, da sonst die Elektronik übersteuert. Dies kann nur dadurch erreicht werden, indem ein gewisser Mindestabstand vom Sensor zur Gewässersohle eingehalten wird. Er wird hauptsächlich durch den Öffnungswinkel des Senders und der zur Verfügung stehenden Wassertiefe bestimmt. Zusätzlich ist bei der Installation äußerste Sorgfalt bei der horizontalen Ausrichtung der Schallkeule geboten, da kleine Winkelungenauigkeiten am Sensor eine große vertikale Verschiebung der Messzellen weiter im Gewässer hervorrufen. Einstellungen mit einer Genauigkeit von 0,5° und besser sind ein absolutes Muss, damit die theoretische Reichweite auch erzielt werden kann.

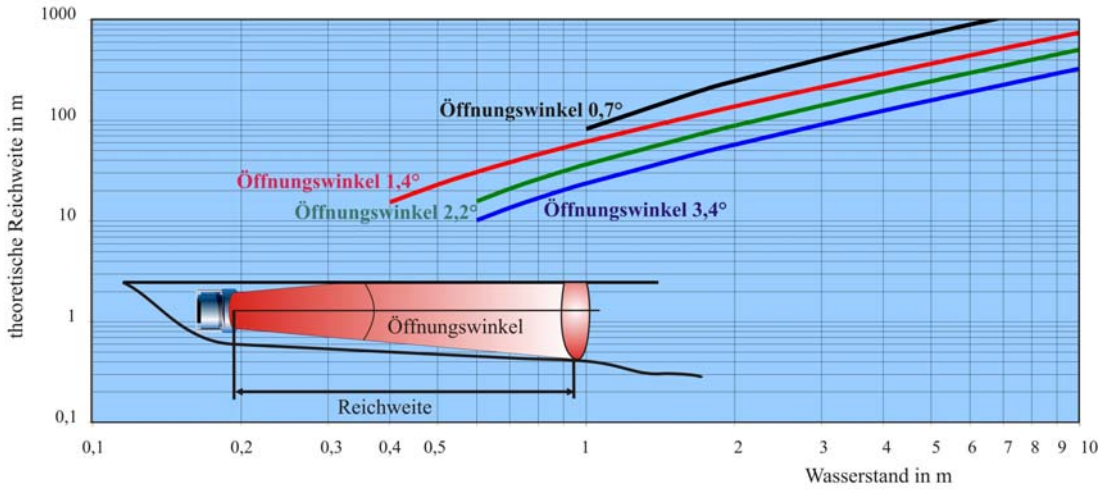


Abb. 6: Geometrische Reichweite eines H-ADCPs in Abhängigkeit des Öffnungswinkels (Die Signaldämpfung durch Schwebstoffe oder die Ablenkung durch Dichtegradienten wurde nicht berücksichtigt.)

5 Schalldämpfung

Die Dämpfung der Schallwellen kann auf drei wesentliche Mechanismen zurückgeführt werden, auf die geometrische Abnahme der Intensität, auf die frequenzabhängige Dämpfung durch Absorption, also die Umwandlung der Schallenergie in Wärme und auf die ebenfalls frequenzabhängige Dämpfung durch die im Wasser vorhandenen Schwebstoffpartikel. Bei allen Vorgängen wird nur die Amplitude vermindert, andere Parameter, wie die Frequenz, bleiben unverändert. Die geometrische Schallabnahme ist vorhanden, da die Intensität mit der Entfernung abnimmt. Bei der Kugelwellenausbreitung nimmt die Intensität mit dem Quadrat der Entfernung ab. In logarithmischer Schreibweise erhält man für den Verlust in Dezibel $20 \lg (r/ro)$, mit r der Entfernung von der Quelle und ro der Bezugsentfernung (1 m). Die Schalldämpfung in reinem Wasser ist hauptsächlich auf die innere Reibung zwischen den Wassermolekülen zurückzuführen. Dieser Vorgang ist frequenzabhängig, je höher die Frequenz desto größer ist die Dämpfung.

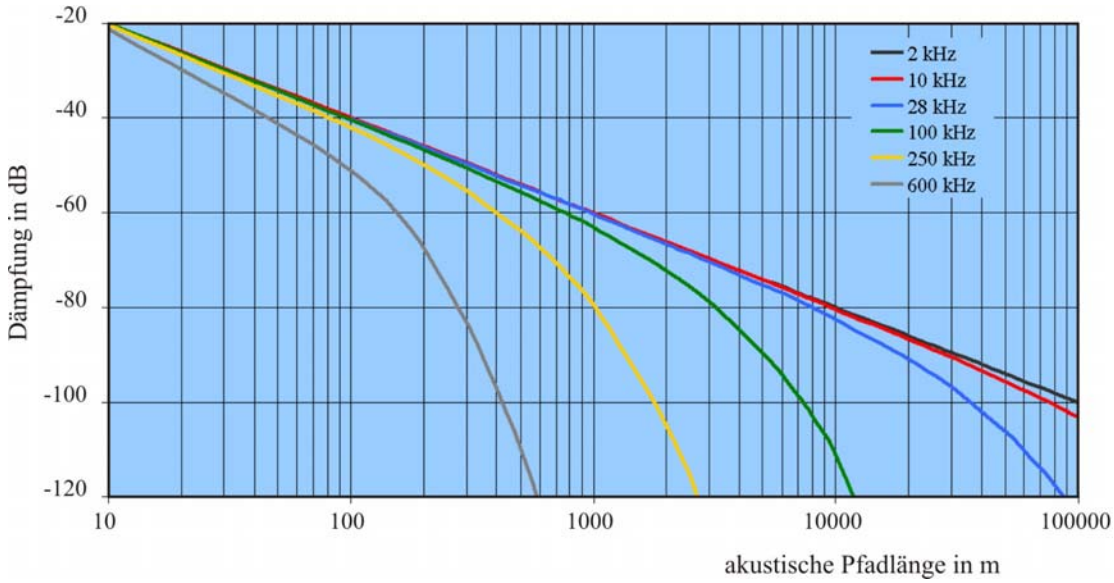


Abb. 7: Geometrische Dämpfung und Absorption der Schallenergie in reinem Wasser (Wassertemperatur 10°, Wassertiefe 2 m, Salzgehalt = 0)

Bei der Anwesenheit von Schwebstoffen im Wasser wird ein Teil der einfallenden Schallenergie je nach Beschaffenheit des Partikels in viele verschiedene Richtungen zurückgestrahlt. Sehr kleine Partikel werden dagegen durch die Schallwellen angeregt, mitzuschwingen. Allerdings sind die Partikel aufgrund ihrer Trägheit nicht in der Lage, ebenso schnelle Bewegungen auszuführen, wie die Wassermoleküle. Dadurch entsteht ein Geschwindigkeitsunterschied an der Grenzschicht zwischen der Oberfläche des Partikels und dem Wasser. Der Geschwindigkeitsunterschied erzeugt Reibung an der Partikeloberfläche und es kommt auch hier zu einem Energieverlust durch Wärmeerzeugung, der viskose Absorption genannt wird. Allerdings nimmt die Gesamtoberfläche der Partikel ab, wenn deren Größe zunimmt. Die Grenzschichtfläche, an der die Reibung stattfindet, wird geringer. Dies hat zur Folge, dass weniger akustische Energie umgewandelt wird. So ergibt sich aus diesen beiden gegenläufigen Faktoren ein Dämpfungsmaximum. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass bei kleinen Partikeln die viskose Absorption maßgebend ist, bzw. dass ab einer Partikelgröße von 0,1 bis 1 mm die Streuung der akustsichen Energie dominiert.

Sowohl aus Abbildung 7 als auch aus Abbildung 8 kann abgeleitet werden, dass die Dämpfung der Schallenergie mit höher werdender Frequenz zunimmt. Dies führt zu dem Umkehrschluss, dass bei hohem Schwebstoffgehalt bzw. bei weiten akustischen Strecken Systeme mit niedrigeren Frequenzen bevorzugt eingesetzt werden sollten. Eine genaue Abgrenzung ist jedoch schwierig, zu vielschichtig sind die einzelnen Faktoren. Als erste Näherung für die maximale Reichweite oder Frequenzwahl eines akustischen Laufzeitdifferenz-Systems dient daher Abbildung 9, die aus gezielten Beobachtungen an bestehenden Systemen aufgebaut wurde. Für H-ADCPs kann derzeit keine Empfehlung für die richtige Wahl der Frequenz gegeben werden, da erst wenige Erfahrungen vorliegen.

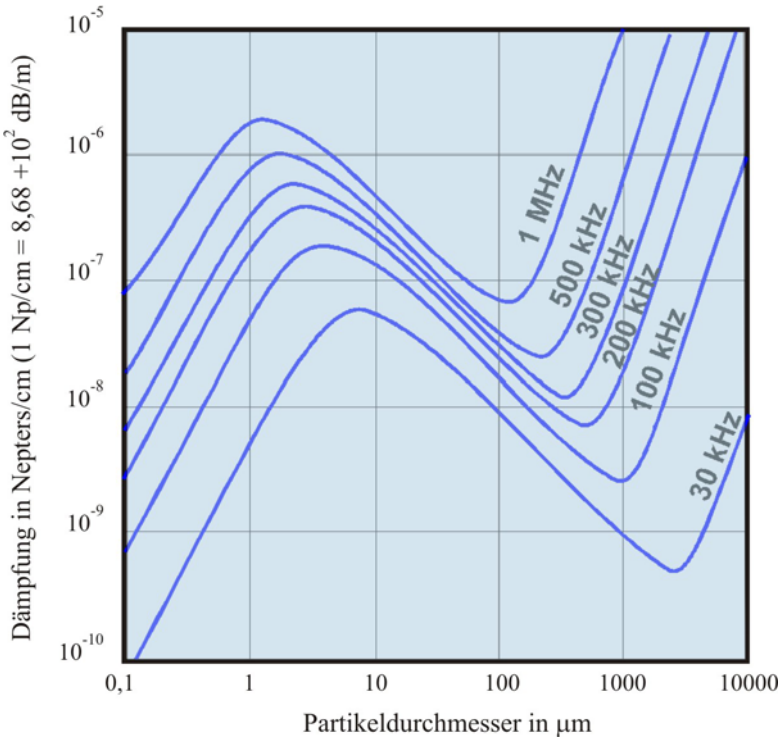


Abb. 8: Viskose Absorption und Streuung bei einem Sedimentgehalt von 1 g/m³ in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und der Frequenz (LAENEN & SMITH 1983)

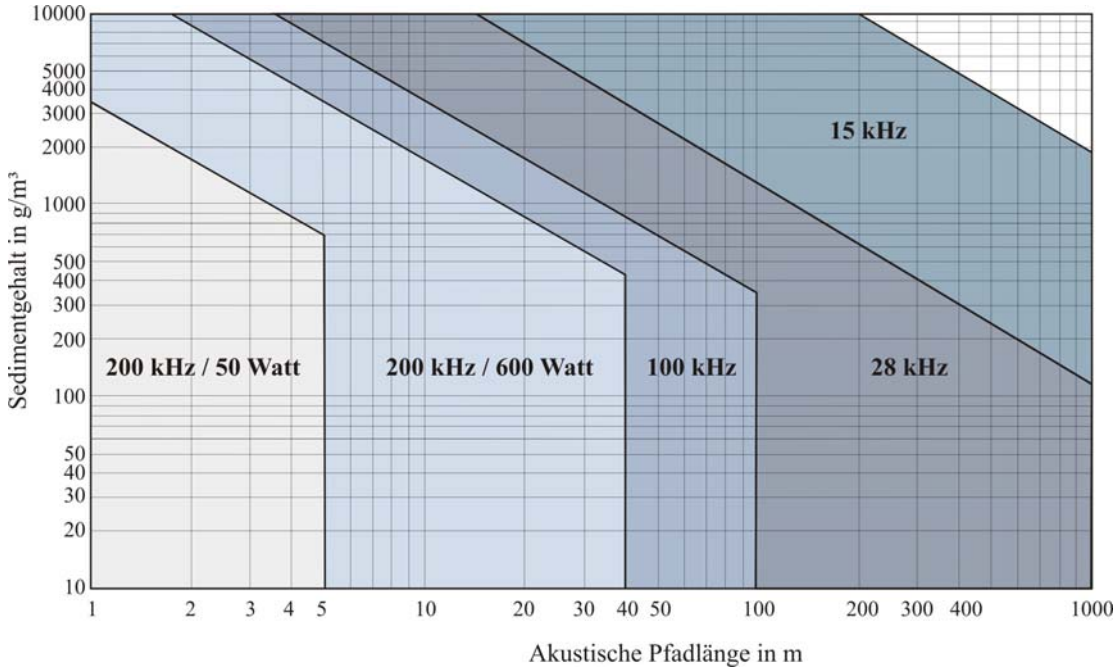


Abb. 9: Empfohlene Sendefrequenz für ein Laufzeitdifferenz-System in Abhängigkeit der akustischen Pfadlänge und des Sedimentgehaltes in einem Gewässer

5.1 Luftblasen

Luftblasen bilden mit dem umgebenden Wasser und der Kompressibilität der eingeschlossenen Luft ein Schwingungssystem. Luftblasen sind daher akustisch äußerst wirksam als Ursache für die Streuung von Schall, aber auch für die Dämpfung. Luftblasen, wie sie zum Beispiel unterhalb von Wehren bei freiem Überfall in das Wasser eingetragen werden oder aber auch Sauerstoff produzierende Pflanzen bzw. Faulgase, die von der Gewässersohle aufsteigen, dämpfen das akustische Signal. Ebenso unterbricht das Schraubenwasser von Schiffen, in das Luftblasen eingetragen werden, die Schallausbreitung. Wegen der Kürze der Beeinträchtigung verursacht dies jedoch in der Regel keinen Datenausfall, sondern allenfalls eine reduzierte Anzahl von Messwerten innerhalb der Integrationszeit. In Bezug auf die stationäre Ultraschall-Durchflussmessung haben daher Luftblasen

- die über überströmte Wehre ins Gewässer eingetragen werden,
- die durch brechende Wellen entstehen (Gebirgsbäche, Schaumkronen),
- die im Kielwasser von Schiffen auftreten,
- die aufgrund biologischer Prozesse entstehen und von der Gewässersohle aufsteigen,
- und die bei starkem Schneefall in den Schneeflocken enthalten sind

eine besondere Bedeutung und können die Messung beeinträchtigen oder zu einem Totalausfall der Messwerterhebung führen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Werden die physikalischen Randbedingungen bei der Installation einer Ultraschallanlage beachtet, bzw. werden im Vorfeld sorgfältig alle beeinflussenden Faktoren richtig abgeschätzt, stellen die stationären Ultraschall-Durchflussmesssysteme eine echte Alternative dar. Systeme in kleinen Gewässern mit geringen Wasserständen, aber auch Anlagen mit Pfadlängen von 600 m bei der Laufzeitdifferenz-Methode, bzw. H-ADCPs mit akustischen Pfadlängen von nahezu 100 m wurden bisher erfolgreich installiert und liefern sowohl im Niedrigwasser wie auch im Hochwasser zuverlässige und genaue Messergebnisse. Weiterentwicklungen im Bereich der elektronischen Komponenten sowie noch leistungsstärkere Wandler mit immer besserer Schallbündelung werden die aktuellen Einsatzgrenzen zukünftig weiter nach oben verschieben. Ein integriertes Hybridsystem, welches aus einer Kombination aus einem Laufzeitdifferenz-System (Messungen bei sehr geringen Wasserständen) und aus einem H-ADCP (Erfassung von Fließgeschwindigkeiten im Nahbereich des Sensors auch bei sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen) besteht, wäre eine zukünftige Lösung, die einzelnen Nachteile der jeweiligen Methode zu eliminieren. Ungeachtet der technischen Möglichkeiten darf aber auch nicht außer Acht gelassen werden, dass Komponenten in einer natürlichen und bei Hochwasser in einer rauen Umgebung installiert werden, was ein gewisses Maß an Wartung und Pflege erfordert.

Literatur

ISO 6416: Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method, Third Edition, 2004

LAENEN, A.; SMITH, W.: Acoustic systems for the measurement of streamflow. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2213, 1983

LURTON, X.: An introduction to underwater acoustics – principles and applications, Springer Verlag, Chichester 2002

URICK, R.J.: Principles of underwater sound for engineers, McGraw-Hill Book Company, NewYork – London, 1967

Kontakt:
Dr.-Ing. Jürgen Skripalle
HydroVision GmbH
Gewerbestraße 61A
87600 Kaufbeuren
Tel.: 08341/966218-0
Fax: 08341/96660-30
j.skripalle@hydrovision.de

1985
Abschluss der Diplom-Prüfung (Dipl.-Ing. FH) an der Fachhochschule Köln

1989
Abschluss der Diplom-Prüfung (Dipl.-Ing. TH) an der Technischen Universität Berlin

1993
Promotion zum Dr.-Ing. an der Technischen Universität Berlin

seit 1993
Geschäftsführender Gesellschafter der Firma Hydro-Consult GmbH

seit 2002
Geschäftsführender Gesellschafter der Firma HydroVision GmbH

Projektbearbeitung
Entwicklung von Systemen zur Durchflussmessung (Ultraschall-Laufzeitdifferenz, Ultraschall-Doppler und Bildfolgeanalyse)

Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen in Baden-Württemberg

Manfred Juraschek

1 Einleitung

Das Land Baden-Württemberg betreibt schon seit den 80er-Jahren Ultraschall-Durchflussmessanlagen an Oberflächenfließgewässern. Die Gerätetechnik war dem damaligen technischen Stand entsprechend mit analoger Signalverarbeitung ausgerüstet. Verwertbare Messergebnisse haben diese Anlagen nur mit großem personellem Aufwand geliefert. Die Anlagen wurden nach einigen Jahren Betrieb und Unterhaltung und einer darauf aufbauenden Kosten-Nutzen-Abschätzung zurückgebaut.
Nachdem in der Ultraschall-Durchflussmesstechnik die digitale Signalverarbeitung Einzug gehalten hatte, wurde der Gedanke, den Durchfluss mittels Ultraschalltechnik zu messen, im Jahre 1999 wieder aufgegriffen.

2 Pegelnetz an Oberflächenfließgewässern

2.1 Messnetzkonzeption

Grundgerüst des Messnetzes bilden die Pegel, welche die großen Flussgebiete kontrollieren. Ihre Daten dienen überregionalen hydrologischen Untersuchungen. Sie liegen daher an wasserwirtschaftlich und hydrologisch bedeutsamen Stellen der wichtigsten Fließgewässer, beispielsweise in deren Mündungsbereich.
Zur Erfassung der regionalen Vielfalt der Einzugsgebiete, der stark variierenden meteorologischen, orografischen und geologischen Verhältnisse sowie Oberflächenbeschaffenheit und unterschiedlichen Flächennutzung, die sich im unterschiedlichen hydrologischen Verhalten der naturräumlichen Einheiten widerspiegeln, wird dieses auf die großen Gewässer ausgerichtete Netz durch Pegel in kleineren Einzugsgebieten ergänzt, welche die verschiedenen naturräumlichen Einheiten und Einflussfaktoren repräsentieren.
Einige Gewässer sind durch die Bewirtschaftung und der damit einhergehenden Stauregelung in ihrem Abflussverhalten stark beeinträchtigt. Die Ermittlung des Abflusses ist mit einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung nicht möglich. Für diese Gewässer bot sich die Installation von Ultraschall-Durchflussmessanlagen an. In Abbildung 1 ist beispielhaft die Realisierung als Kreuzstreckenanlage dargestellt. Der Wasserstand entspricht etwa dem MW-Wert.

Abb. 2: Beispiel einer Ultraschall-Durchflussmessanlage in einem Fließgewässer

In einem zweiten Schritt wurden Pegel mit Ultraschall-Durchflussmessanlagen aufgerüstet, die entweder keine Seilkrananlage hatten bzw. Ersatzbeschaffungen vorhandener Seilkrananlagen anstanden oder wo durch starke Verkrautung des Gewässers im Pegelbereich eine stabile Wasserstands-Abfluss-Beziehung nicht aufgestellt werden konnte.

Insgesamt betreibt das Land Baden-Württemberg 320 Pegel, davon sind derzeit 26 mit Ultraschall-Durchflussmessanlagen ausgestattet.

Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Wasserstandsverhältnisse an den „Ultraschall-Pegeln“. Die Werte sollen die hydraulischen Randbedingungen vermitteln, als hydraulische Kennwerte sind sie nicht geeignet. Die Tabelle macht deutlich, dass die Randbedingungen (Höhenlage der Wandler) der ISO nicht eingehalten werden. Nach Aussagen der Hersteller sollten aber mit Hilfe der digitalen Signalverarbeitungstechnik abweichend von der ISO verlässliche Messungen möglich sein.

Tabelle 1
Hydraulische Kennwerte der in Baden-Württemberg mit Ultraschall-Durchflussmessanlagen ausgerüsteten Fließgewässer

Ort	Gewässer	Einzugsgebiet [km²]	Betrieb seit	NW [cm]	MW [cm]	HW [cm]
Aach (US)	Radolfzeller Aach	0,1	15.1.2003	21	27	51
Besigheim (US)	Enz	2228,28	1.11.1994	86	115	398
Biberach (US)	Kinzig	148,89	1.1.2003	45	64	174
Bietigheim (US)	Metter	133,5	1.7.2002	35	41	100
Blaubeuren (US)	Blau	0,1	15.1.2003	113	128	170
Bolheim (US)	Brenz	375,63	28.6.1905	29	38	70
Bopfingen (US)	Eger	108	1.1.2003	8	14	72
Bruchsal (US)	Saalbach	174,903	1.2.2002	22	28	63
Calmbach (US)	Enz	203,839	1.7.2002	117	127	192
Calmbach-Mitte (US)	Große Enz	115,691	17.7.2002	170	172	201
Dillweissenstein (US)	Nagold	719,48	17.7.2002	85	101	250
Ebnet (US)	Dreisam	257,19	31.7.2002	52	77	114
Geislingen (US)	Bühler	277,76	1.3.2004	14	20	350
Grünsfeld (US)	Wittigbach	181,031	16.12.2002	43	47	56
Hauenstein (US)	Rhein	33975,965	1.1.2004	584	602	680
Neuenbürg (US)	Enz	283,885	1.7.2002	222	233	256
Ohrnberg (US)	Ohrn	153,01	1.7.2002	31	50	239
Salach	Fils	359,59	1.7.2002	29	58	244
Schorndorf (US)	Rems	418,32	1.11.2004	53	63	168
Schwäbisch Gmünd (US)	Rems	169,74	15.1.2003	13	33	145
Tübingen (US)	Ammer	237,5	17.7.2002	31	45	127
Tübingen (US)	Neckar	2058	17.7.2002	370	396	496
Ubstadt (US)	Kraichbach	160,595	18.9.2002	47	54	89
Ulm (US)	Blau	475,4	18.9.2002	35	97	191
Villingen (US)	Brigach	100,284	1.11.2004	25	39	89
Wildberg (US)	Nagold	420,925	1.7.2002	179	195	215

2.2 Ziele

Vorrangiges Ziel war die Einsparung von Personal- und Finanzressourcen im Pegel- und Datendienst. Konkret sollten Aufwendungen für

> die Pegelunterhaltung und Gewässerpflege,
> die bei herkömmlichen Pegeln erforderliche Anzahl von Kalibriermessungen und
> der Datenbearbeitungsaufwand wie z. B. das Aufstellen einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung

reduziert werden sowie

> auf den Neubau von Seilkrananlagen bzw. deren Erneuerung verzichtet werden können.

Darüber hinaus wurde eine Qualitätsverbesserung der Datenbasis erwartet.

3 Vorortbetrieb

3.1 Gewässerunterhaltung

Die Gewässerunterhaltung gestaltet sich aufwendiger, als ursprünglich auf Basis der Aussagen potenzieller Anbieter angenommen wurde. So sind die Räumarbeiten im Gewässerbett insbesondere zwischen den Ultraschallmessstrecken unumgänglich. Es reicht auch nicht aus, nur die Messstrecke frei zu halten. Störungen bis zu Messausfällen verursachen Verkrautungen. Darüber hinaus führen remobilisierte Ablagerungen und Sedimente bei anlaufendem Hochwasser zu Messausfällen. Das heißt, dass theoretisch auch oberstromige Gewässerbereiche regelmäßig frei geräumt werden müssten, um auch im genannten Fall noch verlässliche Messwerte zu erhalten.

3.2 Gerätepflege, Wartung

Ultraschall-Durchflussmessanlagen sind komplexe elektronische Systeme, für deren Wartung fachkundiges Personal zur Verfügung stehen muss. Kenntnisse in der Handhabung von elektrotechnischen Messgeräten, Hard- und Software von Industriecomputern sowie in der Datenfernübertragung sind hierfür Voraussetzung.
Neben vielen kleinen, jeweils von dem speziellen Messort abhängigen Fehlerquellen, treten während des Betriebes vorwiegend Störungen bei den analogen Ein- oder Ausgängen, der Energieversorgung oder der Datenfernübertragung auf. Werden die Umgebungsbedingungen für die Elektronik eingehalten, arbeitet das System relativ störungsfrei, da keine mechanischen Bauteile integriert sind.

Eine Funktionsüberprüfung der Elektronik kann durch eine Wartung vor Ort oder per Fernwartung erfolgen.

In Baden-Württemberg sind keine Wartungsverträge abgeschlossen.

Empfohlene Maßnahmen gibt die Arbeitsanleitung „Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen“ (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 2002):

Wandler
Es wird empfohlen, einmal jährlich eine Reinigung der Wandlerköpfe vorzunehmen, um diese von Bewuchs (Muschelbesatz etc.) zu befreien. Dabei kann der Einsatz von Tauchern notwendig werden. Auf Schlitten montierte Wandler können zur Reinigung verholt werden.

Signalkabel
Bei erdverlegten Kabeln sind keine Wartungsarbeiten notwendig, bei offen verlegten Kabeln erfolgt Sichtkontrolle.

Elektronik
Die Messelektronik ist prinzipiell wartungsfrei. Eine gelegentliche Überprüfung der einwandfreien Funktion der Anzeigeelemente (Leuchtdioden, LCD) wird empfohlen. Ebenso sollte die Funktion des Lüfters von Zeit zu Zeit kontrolliert werden. Reparatur bzw. Austausch

defekter elektronischer Bauteile gehört nicht zur allgemeinen Wartung und ist nur durch fachkundiges Personal ausführbar.
Für die Überprüfung der einwandfreien Funktion der Messelektronik steht zudem ein Messwertsimulator zur Verfügung, mit welchem verschiedene Frequenzen und Pfadlängen simuliert werden können.

Haltekonstruktion der Wandler

Die Ausrichtung der Wandler sollte durch eine Sichtkontrolle erfolgen. Insbesondere nach Hochwasserereignissen ist eine Kontrolle auf Beschädigungen, Anlagerungen oder Hindernissen im Messpfad vorzunehmen.

3.3 Kalibriermessungen

Bedingt durch das Messprinzip kann auf hydrometrische Vergleichsmessungen zur Kontrolle des Kalibrierfaktors nicht verzichtet werden. Für diese Messungen kommen im Wesentlichen zwei Messverfahren in Betracht:

- Durchflussmessungen mit einem mobilen ADCP-Messgerät
- Punktmessungen mit hydrometrischen Flügeln oder (bei sehr geringen Geschwindigkeiten) mit magnetisch-induktiven Sonden

3.4 Überprüfung der Querschnittsgeometrie

Die Überprüfung der Querschnittsgeometrie ist wichtig, da ihre Größe direkt in das Messergebnis Durchfluss eingeht. Durch Verlandung oder Erosion ändert sich das Feuchtprofil. Diese Messung kann auch bei niedrigen Pegelständen erfolgen. Sie muss jährlich und unbedingt nach einem Hochwasserereignis durchgeführt werden. Es genügen Peilungen in vorgegebenen Profilen. Die Profile müssen den gesamten Bereich zwischen den Messpfaden abdecken. Bei Einsatz eines ADCP-Messgerätes zur Kalibrierung liefert dieses Gerät bereits die Profildaten.

4 Datenspeicherung, Datenabruf, Datenprüfung

Die Daten der Ultraschall-Durchflussmessanlage wie Strömungsgeschwindigkeiten, Durchfluss und Status werden an den Datensammler im Pegelhaus übergeben. Von dort werden die Daten von der Hochwasservorhersagezentrale abgerufen und den Sachbearbeitern, die mit der Datenprüfung betraut sind, in einer DV-Fachanwendung zur Verfügung gestellt. Ursprünglich war angedacht, anhand der Geschwindigkeitsdaten und des Feuchtprofiles den Durchfluss nach ISO zu ermitteln. Die Anlagen liefern allerdings die hierzu erforderlichen Querschnittsdaten nicht. Ebenso wird von den Lieferanten die von ihnen eingesetzte Berechnungsvorschrift für den Durchfluss mit Hinweis auf „geheime“ Firmware, die nicht offen gelegt werden könne, nicht zur Verfügung gestellt. Ein wesentliches Element der Qualitätssicherung und der Datenprüfung ist somit nicht gegeben.

Als weitere Möglichkeit des Datenabrufs ist die mittels der firmenspezifischen Abrufsoftware. Diese Möglichkeit wird jedoch nur bei speziellen Fragestellungen, die außerhalb des Routinedatenabrufs liegen, genutzt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die ursprünglich vorgegebenen Ziele wurden nur zu einem geringen Teil erreicht. Insbesondere in kritischen Gewässerabschnitten wie z. B. bei Stauregelung mit anlaufendem Hochwasser stehen gerade dann die Daten nicht zur Verfügung. Auch der Aufwand für Betrieb und Unterhaltung liegt deutlich über den geplanten Ansätzen. Darüber hinaus sind sowohl für Betrieb und Unterhaltung der Anlage selbst als auch für die Kalibriermessungen mit ADCP-Messtechnik höher qualifizierte Personen erforderlich. Auch die Annahme, man könne künftig auf Seilkrananlagen verzichten, ist allenfalls in Einzelfällen zutreffend.

Sicherlich liefern Ultraschall-Durchflussmessanlagen bei der Einhaltung der Anforderungen an das Gewässerprofil und die Hydraulik, was in der Regel bei großen Gewässern gegeben ist, verwertbare Messdaten. Beim Einsatz in den Gewässern des Landes Baden-Württemberg ist der Aufwand im Verhältnis zum Nutzen nur bei höchstens der Hälfte der oben genannten Anlagen zu rechtfertigen.

Literatur

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: Arbeitsanleitungen im Pegel- und Datendienst Baden-Württemberg „Bau und Betrieb von Ultraschall-Durchflussmessanlagen“, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe 2002

Jahrgang: 1949

1983 – 1989
Studium des Maschinenbauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe

seit 1985
Mitarbeiter der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Leiter des Sachgebiets „Pegel- und Datendienst, Mess- und Gerätetechnik“ im Referat „Hydrologie, Hochwasservorhersage“

Kontakt:
Dipl.-Ing. Manfred Juraschek
Landesanstalt für Umwelt, Messungen
und Naturschutz Baden-Württemberg
Griesbachstraße 1, 76185 Karlsruhe
Tel.: 0721/5600 1207
Fax: 0721/5600 1456
manfred.juraschek@lubw.bwl.de

Durchflussmessanlage Wireless

– Entwicklung einer kabellosen Laufzeit-Messmethode –

Peter Franke und Wolfgang Frey

1 Einleitung

Kontinuierlich arbeitende Messsysteme zur Erfassung des Durchflusses in Oberflächengewässern sind neben der Erhebung von Gütedaten die Grundlage aller nachhaltigen wasserwirtschaftlichen Maßnahmen. Die Ultraschall-Messmethode hat sich als leistungsfähiges Werkzeug der Hydrometrie durchgesetzt. Der Vorzug, berührungslos zu messen, gekoppelt mit einer hohen Messgenauigkeit und einer zeitlichen Auflösung im Sekundenbereich, hat Ultraschall-Durchflussmessanlagen für die zeitgemäße Erfassung von Gewässerabflüssen unersetzlich gemacht.

Für Ultraschall-Durchflussmessgeräte, die nach dem Laufzeitdifferenz-Prinzip arbeiten, sind die maßgeblichen Bauteile neben den hydroakustischen Wandlern, die sowohl als Sender und Empfänger arbeiten, die elektronische Systemeinheit sowie die entsprechenden Kabelverbindungen. Die Wandler befinden sich paarweise höhengleich, diagonal zur Strömung an den gegenüberliegenden Ufern.

Nur durch die Synchronisation zusammengehörender Wandlerpaare auf den gegenüberliegenden Gewässerseiten mittels Kabelverbindung wird gewährleistet, Laufzeitdifferenzen zu erfassen, deren Bestimmung die Grundvoraussetzung für die Ermittlung der integralen Fließgeschwindigkeit in der jeweiligen Messebene ist. Je höher die Laufzeitdifferenzen aufgelöst werden können, desto genauer ist die Messung der Fließgeschwindigkeiten in den Messebenen und der daraus für die Kontinuitätsgleichung abgeleiteten mittleren Fließgeschwindigkeit, mit deren Hilfe und bei bekannter Querschnittsfläche der Durchfluss errechnet wird.

2 Stand der Technik

Dem Stand der Technik entsprechend sind bisher bei allen Ultraschall-Durchflussmesssystemen, die nach dem Laufzeitdifferenz-Verfahren arbeiten, die hydroakustischen Wandler eines Messpfades durch je ein Kabel mit der Systemeinheit verbunden. Nur über die Kabelverbindungen können die Wandler an gegenüberliegenden Gewässerufern gleichzeitig als Sender und Empfänger betrieben werden, um ein taktgenaues Arbeiten der hydroakustischen Wandler zu erreichen.

Die erforderlichen Kabelverbindungen können bei größeren Gewässerbreiten oder einer Mehrebenenanlage zu erheblichen Kabellängen führen. Die Verlegung an Land erfolgt in

Kabelgräben, im Gewässer soweit möglich unter Einsatz von Tauchern in eingespülten Rinnen. Bei felsiger Gewässersohle kann sogar eine Horizontalbohrung unter dem Flusslauf erforderlich werden, um die Kabel zu installieren. Trotz der in Hüllrohren geschützten Kabel - Quantum Hydrometrie verwendet z. B. in der Regel bei Gewässerquerungen Edelstahl-Hüllrohe – besteht im späteren Betrieb die Gefahr, dass die Kabel durch äußere Einflüsse, an Land z. B. durch anderweitige Baumaßnahmen oder durch Gezeiten- und Strömungsbewegungen strapaziert und beschädigt werden. Neben dem Messdatenverlust werden dann zusätzliche Kosten für die Reparatur oder den vollständigen Austausch einzelner Kabel notwendig. Der finanzielle Aufwand der Kabelverlegung, der unter Umständen den Preis der eigentlichen Messanlage weit überschreiten kann, ist ein bisher unvermeidbarer Kostenfaktor bei der Entscheidung für den Einbau einer Laufzeitdifferenz-Ultraschall-Durchflussmessanlage.

Unabhängig vom Einbauverfahren ist die Kabelverlegung stets aufwändig und damit kostenintensiv, was dazu führen kann, dass an Messstellen in größeren Gewässern, an denen eine Laufzeitanlage an sich wünschenswert wäre, auf die Realisierung ganz verzichtet wird.

Quantum Hydrometrie bietet die gängigen Verfahren für Ultraschall-Durchflussmessgeräte - Laufzeit und Doppler - in herkömmlicher Weise und als kabellose Weiterentwicklung des Laufzeit-Verfahrens an. Aufgrund unserer langjährigen Erfahrung empfehlen wir ausschließlich eine den hydrologischen und geomorphologischen Randbedingungen und der Bedeutung der zu erhebenden Durchflusswerte gerecht werdende Anlagenkonfiguration. In staugeregelten Gewässerabschnitten und bei größeren Gewässerbreiten haben sich Laufzeitdifferenz-Ultraschall-Durchflussmessanlagen bewährt. Die unbegrenzte Reichweite der Messpfade, die Robustheit und Qualität der Messwerte auch bei hoher Schwebstoffkonzentration sowie die Einsetzbarkeit in tidebeeinflussten Ästuarien verlangen ihre Anwendung. Bei kleinerer Gewässerbreite liefert der Einsatz einer nach dem Doppler-Prinzip arbeitenden Anlage ebenfalls qualitativ einwandfreie Messwerte.

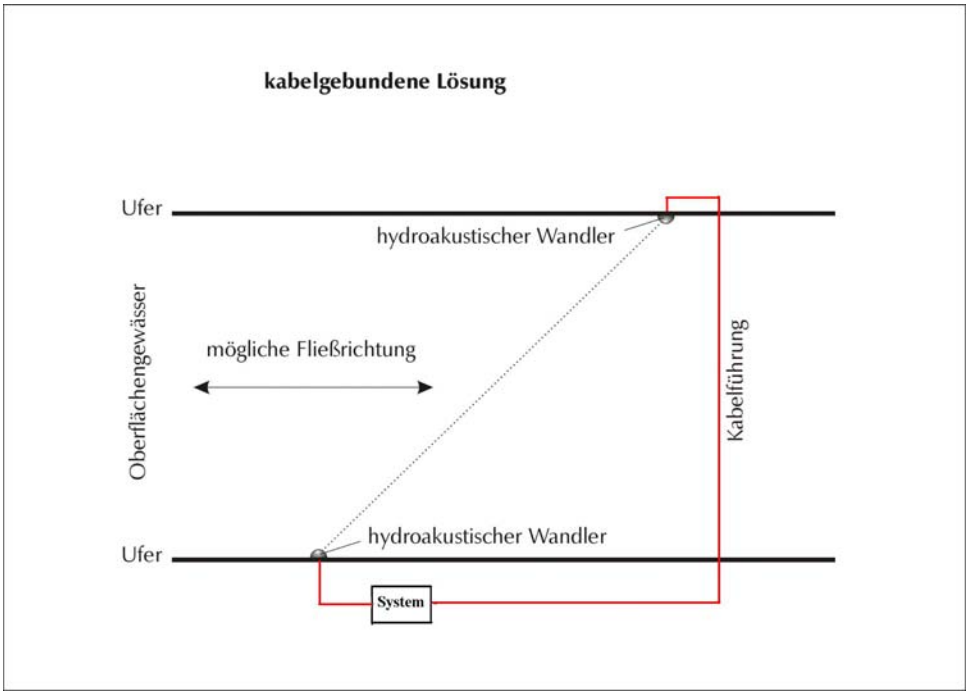


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Einebenen-Einstrecken-Ultraschallmessanlage

3 Kabellose Laufzeitdifferenz-Ultraschall-Durchflussmessanlage

Die patentrechtlich geschützte Entwicklung von Quantum Hydrometrie:

Die Substitution aller Kabelverbindungen durch synchron arbeitende, autarke Sende- und Empfangseinheiten auf beiden Gewässerseiten

ist das Resultat eines völlig veränderten Messkonzeptes.

Der Einsatz autonomer Sende- und Empfangssysteme, die über ein GPS-gestütztes Zeitsignal synchronisiert und paarweise auf Nanosekunden genau abgestimmte Messeinheiten bilden, sind das wesentliche Ergebnis dieser Entwicklung. Die Notwendigkeit der nahezu absoluten Zeitsynchronisation folgt aus den physikalischen Randbedingungen, die sich aus dem angestrebten Einsatzbereich für die nach dem Laufzeitdifferenz-Prinzip arbeitende, kabellose Ultraschalltechnik ergibt: **Acoustic Flowmeter Wireless (AFW)**.

Bei der Erfassung von Fließgeschwindigkeiten mit einer Auflösung von 1 mm/s, müssen – bei ca. 1400 m/s für die Schallgeschwindigkeit im Wasser und einer angenommenen Pfadlänge von 10 m – Zeitdifferenzen von $5 * 10^{-9}$ s mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Die entsprechende Auflösung des Messsystems sollte um zwei bis drei Zehnerpotenzen genauer sein, was mit der vom System her möglichen Auflösung des Einzelsignals im Pikosekunden-Bereich erreichbar ist.

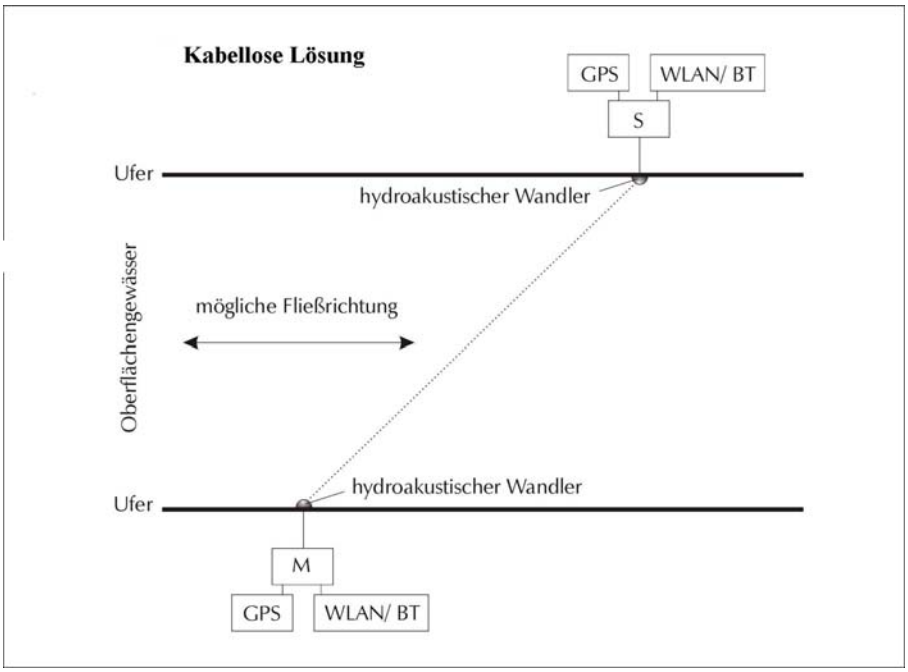


Abb. 2: Schematische Darstellung des kabellosen Grundkonzeptes

Abbildung 2 zeigt das kabellose Grundkonzept des Acoustic Flowmeter Wireless. Mit dem AFW wird die Erfassung genauester Laufzeitdifferenzen realisiert, was bisher kabellos nicht möglich war.

Damit wird der begrenzende oder alles verhindernde Faktor Kabelverbindung bei der Realisierung einer Laufzeitdifferenz-Ultraschall-Durchflussmessanlage vermieden.

Die AFW-Anlage besteht aus dem Hauptsystem (Master (M)) auf einer Gewässerseite und einem oder mehreren Nebensystemen (Slave (S)) auf der gegenüberliegenden Gewässerseite. Die Kabel als Verbindung zwischen beiden Gewässerseiten entfallen. Es kommen neue Komponenten hinzu, die die Steuerung - Synchronisation und drahtlose Datenübertragung untereinander - realisieren. Alle Teilsysteme sind aktive, autarke Systeme, die über eine drahtlose Übertragungsstrecke miteinander kommunizieren. Für die drahtlose, digitale Übertragung der Steuer- und Messwerte zwischen den Wandlern werden beispielsweise Wireless Local Area Network (WLAN)- oder Bluetoothadapter (BT) eingesetzt.

Die auf beiden Uferseiten eingesetzten Teilsysteme werden unabhängig voneinander mit einem Quarz synchronisiert. Um sie synchron laufen zu lassen, wird ein hardwareausgelöstes, externes und weltweit gleiches Signal im Nanosekunden-Bereich benutzt, gemeint ist ein satellitengestütztes GPS-Signal. Ein einheitliches Protokoll verarbeitet das Signal und spezielle Oszillatoren gewährleisten, dass alle Messsysteme und damit auch die Steuerungshardware synchron laufen. Die beiden Wandler eines akustischen Pfades werden auf diese Weise mit einer im Pikosekunden-Bereich angesiedelten Genauigkeit synchronisiert. Dafür musste die bisherige kabelgebundene Messtechnik vollkommen verändert und eine spezielle Master-Slave-Lösung neu entwickelt werden.

Steuerworte vom Master an den Slave und Status- bzw. Messwerte vom Slave an den Master werden über eine drahtlose Verbindung wie WLAN, Bluetooth oder existierende andere Systeme übertragen. Die Auswertung des analogen Messsignals unmittelbar am jeweiligen Empfänger und Umwandlung in ein digitales Signal sowie dessen Übertragung garantieren eine absolut störungsfreie Verbindung (siehe Abbildung 3).

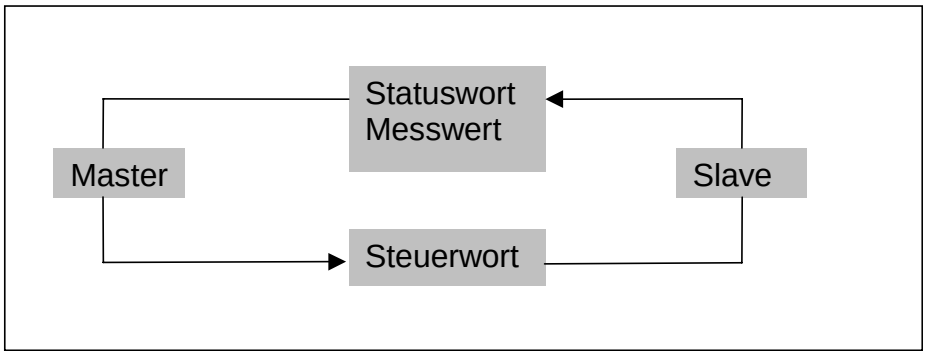


Abb. 3: Schalt- und Steuerbild Master-Slave über WLAN, Bluetooth oder andere

4 Einsatz von AFW - Anlagen

Seit mehr als zehn Jahren werden die Zu- und Abflüsse der Lagune von Venedig mit Laufzeitdifferenz-Durchflussmessanlagen der Fa. Quantum Hydrometrie gemessen, um die zur Zeit herrschenden aquatischen Verhältnisse als Beweissicherung für das im Bau befindliche Hochwasserschutzprojekt MOSE zu dokumentieren. Auftraggeber und Betreiber ist das Consorzio Venezia Nuova, ein Ingenieurbüro, das im Auftrag des Wasserbauamtes Venedig

agiert. Das MOSE-Projekt ist ein System aus 78 flutbaren an der Gewässersohle drehbar gelagerten Stahltoren in den drei Zuflüssen der Adria in die Lagune und soll Venedig bei extremen Adriawasserständen vor Überschwemmungen schützen. Der Wasseraustausch durch diese Öffnungen zwischen Lagune und Adria stellt die Basis des sehr empfindlichen ökologischen Gleichgewichtszustandes in der Lagune dar. Von Projektgegnern wird befürchtet, dass durch die zeitweise Abriegelung der Adriazuflüsse in die Lagune der natürliche Ökozustand der Lagune nachteilig verändert werden könnte.

Bei zwei der drei großen Adriazuflüsse in die Lagune, Malamocco und Chioggia, wurden im Zuge der MOSE-Baumaßnahmen die Molen neu gestaltet und die dort installierten, bisher mit Responderanlagen ausgerüsteten Systeme, durch AFW-Anlagen ersetzt, um bei Pfadlängen von jeweils ungefähr 560 m die neuerliche Verlegung der Kabel zu vermeiden.

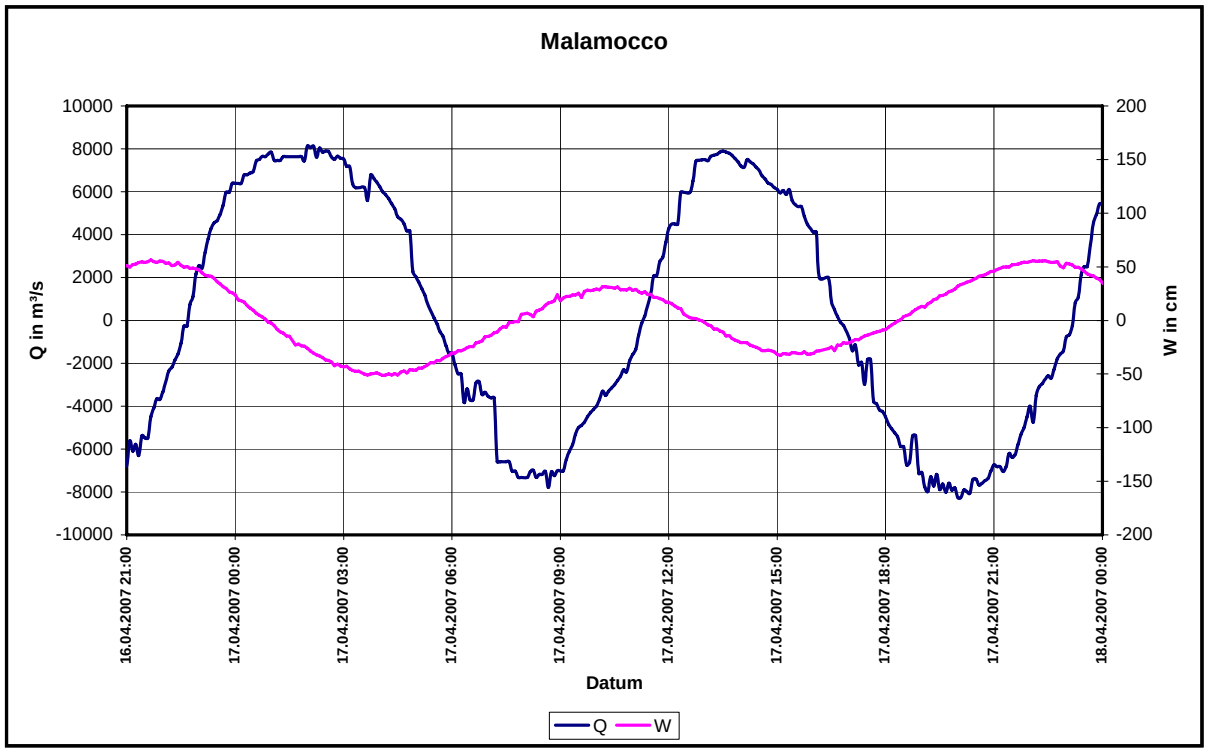


Abb. 4: Durchfluss und Wasserstand Bocca di Malamocco, Lagune von Venedig

Abbildung 4 zeigt den durch Tide generierten Zustrom aus der Adria in die Lagune (positiv definierte Fließrichtung) und den Abstrom aus der Lagune an der Messstelle Bocca di Malamocco, der mittleren direkt der Hauptinsel Venedig gegenüberliegenden, durch Molen begrenzten Schifffahrtsöffnung von ca. 400 m Breite und im Mittel 12 m Wassertiefe.

Die zeitgleich aufgezeichneten Durchflüsse von der baugleich installierten AFW-Anlage in der südlichsten Schifffahrtsöffnung, Bocca di Chioggia, zeigt Abbildung 5. Die der tideabhängigen Schwingung des Durchflusses überlagerten Oberschwingungen werden als Resultat aus Wind, Schiffsbewegungen und der Eigenschwingung der Lagune interpretiert.

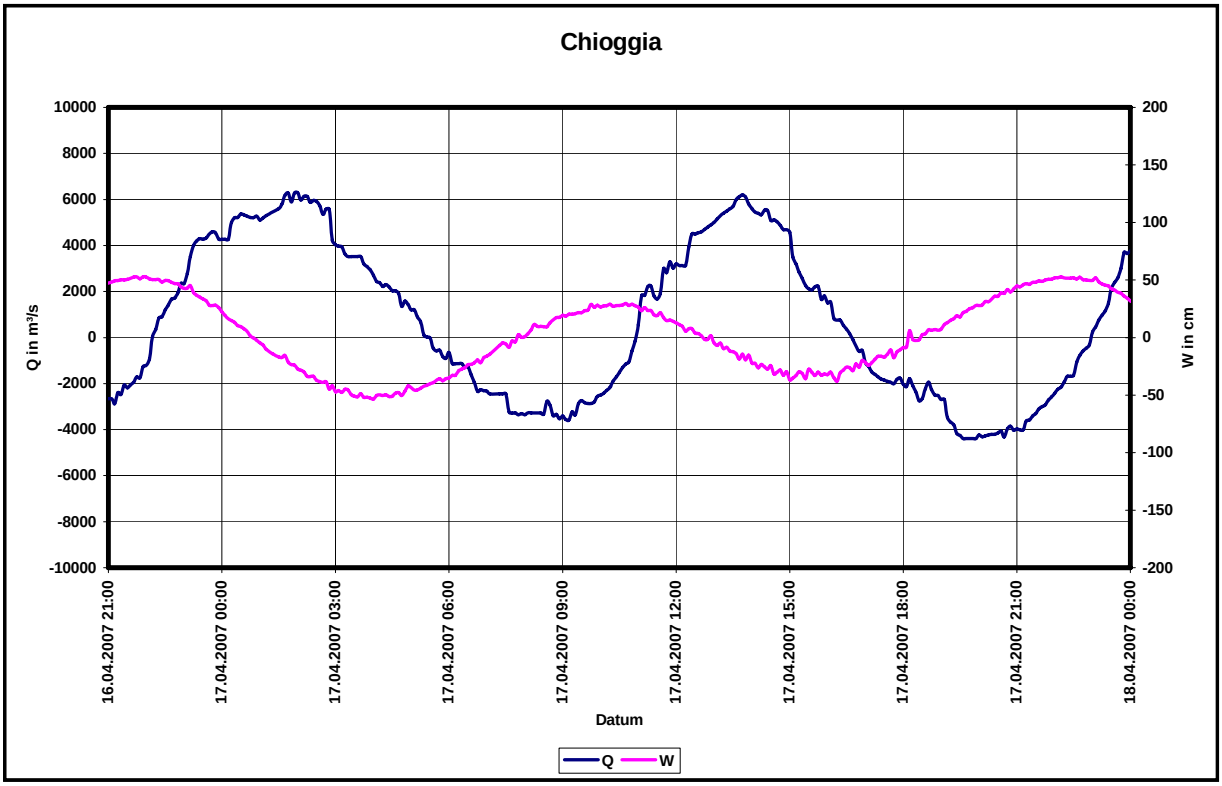


Abb. 5: Durchfluss und Wasserstand Bocca di Chioggia, Lagune von Venedig

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die von Quantum Hydrometrie entwickelte neue Systemkonfiguration der kabellosen Ultraschall-Laufzeitdifferenz-Durchflussmessanlagen ermöglicht den technisch-wirtschaftlich unbegrenzten Einsatz von Durchflussmessanlagen bei Gewässern großer Breite oder unwegsamem Gelände, d. h. überall dort, wo die Verlegung der Kabelverbindungen bisher auf technische Schwierigkeiten oder an wirtschaftlich unvertretbare Grenzen gestoßen ist. Darüber hinaus ist die mit den Kabeln unweigerlich verbundene Gefahr der durch vielfältige Ursachen begründeten Beschädigungen gänzlich gebannt. Die autark arbeitenden Wandlerpaare auf gegenüberliegenden Gewässerseiten werden über ein modifiziertes GPS-Signal im Pikosekunden-Bereich synchronisiert. Sie kommunizieren störungsfrei und sicher über Funk (ISM Band).

Die in der Lagune von Venedig installierten AFW-Anlagen arbeiten, abgesehen von Störungen durch den in unmittelbarer Nähe stattfindenden Baubetrieb, einwandfrei.

Kontakt:
Prof. Dipl.-Ing. Peter Franke
Quantum Hydrometrie GmbH
Zossener Str. 55, 10961 Berlin
Tel.: 030/ 69 81 10 10
Fax: 030/ 69 81 10 99
franke@quantum-hydrometrie.de

Jahrgang: 1937

1957 – 1965
Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin

1965 – 1971
Wissenschaftlicher Assistent/Oberingenieur
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft - IWAWI TUB

1971 – 2002
Professor für Konstruktiven Wasserbau, IWAWI TUB

1991 – 2001
Geschäftsführender Gesellschafter der Hydro-Consult GmbH, Berlin

seit 1994
Gesellschafter der Quantum Hydrometrie GmbH

Mitglied
ICOLD – DTK, DVGW, DWA

Kontakt:
Dipl.-Ing. Wolfgang Frey
Quantum Hydrometrie GmbH
Zossener Str. 55, 10961 Berlin
Tel.: 030/ 69 81 10 19
Fax: 030/ 69 81 10 99
frey@quantum-hydrometrie.de

Jahrgang: 1955

1974 – 1982
Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin

1982 – 1991
Wissenschaftlicher Mitarbeiter/Assistent
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft - IWAWI TUB

1991 – 2001
Geschäftsführender Gesellschafter der Hydro-Consult GmbH, Berlin

seit 1994
Geschäftsführender Gesellschafter der Quantum Hydrometrie GmbH

Mitglied
ICOLD – DTK, DWA

Durchflussbestimmung bei größeren Geometrien mit Ultraschall

Kreuzkorrelationsverfahren

Michael Teufel

1 Einleitung

Der akustische Dopplereffekt wird seit vielen Jahren zur Geschwindigkeits- und Durchflussmessung von Flüssigkeiten und Gasen eingesetzt. Dabei ist die präzise Messung in Wasser und Abwasser in Rohren und offenen Kanälen mittlerer und größerer Geometrien immer noch eine besondere Herausforderung.

Einfache Dopplersysteme bestimmen die Geschwindigkeit im Wasser, die durch Multiplikation mit dem durchströmten Fließquerschnitt in einen Volumenstrom umgerechnet wird. Da dem Verfahren eine räumliche Zuordnung der gemessenen Geschwindigkeit fehlt, ist die Bestimmung des Volumenstroms meist sehr ungenau. Statistische Korrekturen und Kalibrierungen können die erzielbare Genauigkeit erhöhen, allerdings lassen sich auch dann nur im Einzelfall höhere Genauigkeiten erzielen. Mit Pulsdopplerverfahren (ADCP-Messverfahren) lässt sich die Genauigkeit erhöhen, weil eine lokale Zuordnung der Geschwindigkeit möglich ist. Mit einer räumlichen Messfenstergröße von typisch mehr als 0,3 m werden diese Verfahren allerdings meist erst bei größeren Gewässern eingesetzt.

Das Kapitel 2 erläutert die Bestimmung von Geschwindigkeitsprofilen mit Hilfe von Ultraschall. Dabei wird die Dopplermesstechnik (Kapitel 2.1) mit der Kreuzkorrelationsmesstechnik (Kapitel 2.2) verglichen. Kapitel 2.3 beschreibt die Benutzung der Kreuzkorrelation bei größeren Abmessungen. In Kapitel 3 werden erste Anwendungen eines auf dieser Technologie basierenden Messsystems, des OCM *Pro* LR vorgestellt. Das Kapitel 4 fasst die Arbeit zusammen und zeigt einen Ausblick auf.

2 Bestimmung von Geschwindigkeitsprofilen mit Ultraschall

Ultraschall wird zur Geschwindigkeits- und Durchflussmessung im Transmissions- und Reflektionsverfahren eingesetzt. Transmissionsverfahren sind im Wesentlichen Laufzeit-Differenz-Messverfahren, die hier nicht weiter betrachtet werden. Im Gegensatz zu Transmissionsverfahren, die in einphasigen, homogenen Medien, d. h. möglichst sauberem Wasser die besten und zuverlässigsten Ergebnisse erzielen, sind sämtliche Reflektionsverfahren auf ein

mindestens zweiphasiges Fluid angewiesen, d. h. es müssen Verunreinigungen in Form von Schwebstoffen oder kleinsten Luftbläschen im Wasser vorhanden sein. Bei Reflektionsverfahren wird die Strömungsgeschwindigkeit indirekt gemessen; die gemessene Geschwindigkeit von Streuteilchen wird mit der des Wassers gleichgesetzt, was in guter Näherung möglich ist (LEFHALM 2005; JENSEN 1996).

2.1 Dopplermesstechnik

Es gibt einige Anbieter für einfache Dopplermesssysteme für Durchflussmessungen. Diese nutzen normalerweise Piezokeramiken als Signalgeber und eine separate Piezokeramik als Empfänger (TEUFEL 2004). Die Sendekeramik strahlt kontinuierlich Ultraschall in einem kleinen Kegel in das Wasser; der Empfänger misst das Doppler-verschobene Frequenzecho von Streuern, i. A. Schwebstoffen oder kleinen Luftbläschen. Um den Durchfluss zu bestimmen, wird diese Geschwindigkeit meist mit einem empirischen Faktor beaufschlagt und mit dem durchströmten Fließquerschnitt multipliziert. Die erreichbare Genauigkeit ist in der Regel gering, da die Geschwindigkeit ohne räumliche Zuordnung bestimmt wird.

Eine deutliche Verbesserung des Messsystems erhält man, wenn man anstelle einer kontinuierlichen Ultraschallaussendung mit einem kurzen Ultraschallpuls arbeitet. Bei diesem Aufbau wird üblicherweise auf einen separaten Empfänger verzichtet, da die Sendekeramik auch als Empfänger dienen kann. Bei Kenntnis der Schallgeschwindigkeit (c (in Wasser, bei 20°C) = 1480 m/s) kann man leicht eine räumliche Zuordnung l der Echosignale berechnen, wenn man den Zeitabstand T zwischen Aussendung des Ultraschallpulses und dem Empfang bestimmt:

$$l = \frac{c \cdot T}{2}$$

Die Abbildung 1 soll dies verdeutlichen.

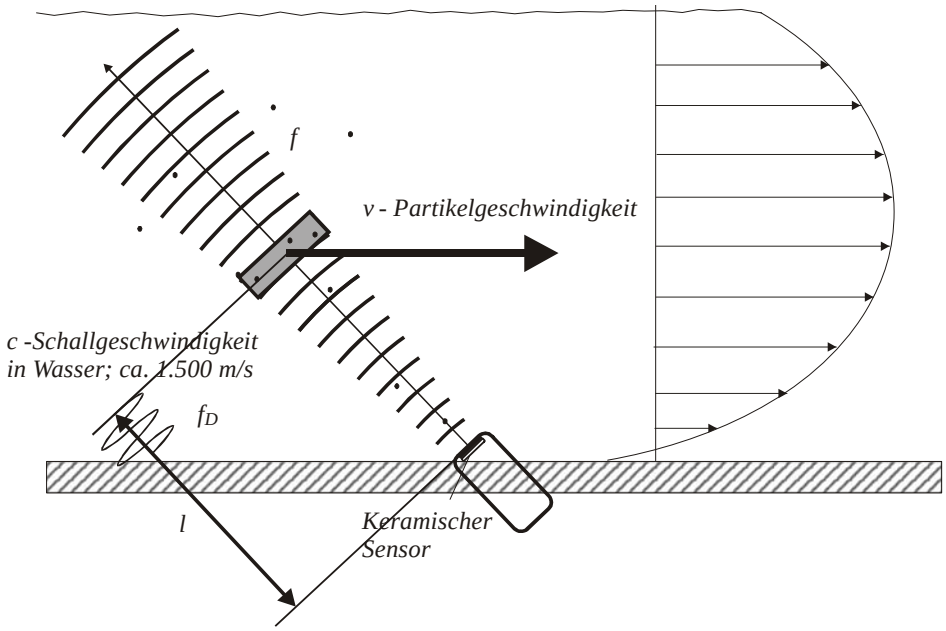


Abb. 1: Dopplersystem

Normalerweise werden die Echosignale in Zeitfenstern gespeichert, in denen dann die Geschwindigkeit v bestimmt wird; entsprechend der obigen Gleichung kann diesem Zeitfenster ein Raumfenster zugeordnet werden. Die direkte Bestimmung der Doppler-verschobenen Frequenz f_D ist bei üblichen Geschwindigkeiten schwierig

$$f_D = \frac{f \cdot c}{c - 2 \cdot v \cdot \cos\alpha}$$

Einige Zahlen sollen dies verdeutlichen: Bei einer Sendefrequenz von 1.000.000 Hz beträgt die Frequenzverschiebung typisch 100 bis 1.000 Hz. Im Allgemeinen ist es viel schwieriger, diese Verschiebung direkt zu messen, als die Doppler-verschobene Frequenz mit der ausgesandten zu überlagern und die Schwebungsfrequenz $\Delta f = (f_D - f)$ zu bestimmen:

$$v = \frac{(f_D - f) \cdot c}{2 \cdot f \cdot \cos\alpha} = \frac{\Delta f \cdot c}{2 \cdot f \cdot \cos\alpha}$$

Die Abbildung 2 zeigt diese Schwebungsfrequenz.

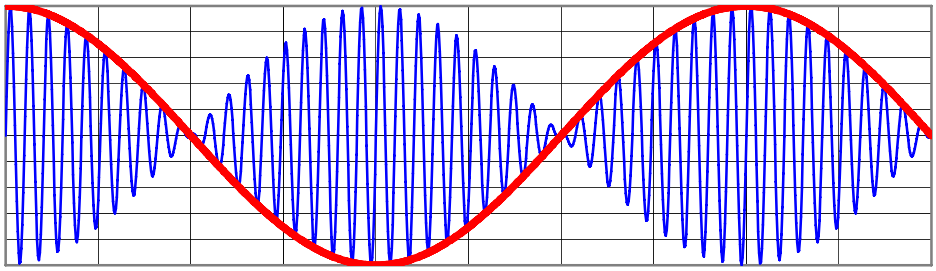


Abb. 2: Schwebungsfrequenz des reflektierten Echos

Eine einfache Bestimmung der Schwebungsfrequenz ist nur möglich, wenn genügend Schwingungen der Grundfrequenz in der Schwebung enthalten sind. Dies limitiert die räumliche Auflösung auf typisch ca. 0,30 – 0,40 m.

Die Frequenzmessung wird üblicherweise indirekt über eine Zeitmessung zwischen 2 „Nulldurchgängen“ der Schwebung zurückgeführt; bei dieser Art der Frequenzbestimmung ist eine Messung bei 0 Hz, bzw. bei v = 0 m/s nicht möglich.

2.2 Kreuzkorrelationsmesstechnik

Die Kreuzkorrelation ist ein mathematisches Auswerteverfahren, das mit der Entwicklung schneller und leistungsfähiger Prozessoren Einzug gefunden hat in die Signalauswertung. Als Durchflussmessung (LUCAS 2003) wird es bei zweiphasigen Fluiden eingesetzt, wie die Abbildung 3 schematisch verdeutlicht.

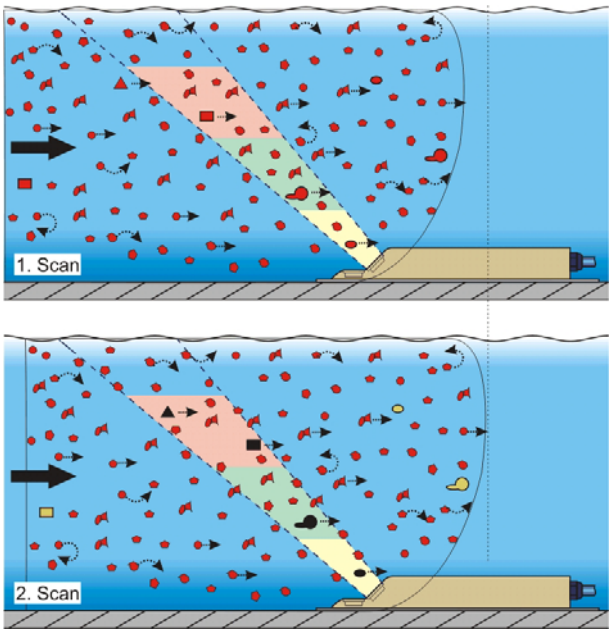


Abb. 3:
Akustische Kreuzkorrelationsmessmethode

Die Abbildung zeigt den Kreuzkorrelationssensor OCM *Pro* CF der Fa. NIVUS und sein Funktionsprinzip (TEUFEL 2006). Der akustische Sensor am Boden sendet einen kurzen Ultraschallpuls ins Wasser unter einem Winkel von 45° zur Strömungsrichtung. Der Sensor empfängt dann die Echos des durchstrahlten Strömungsfeldes und sortiert sie in Zeitfenster, d. h. Raumfenster. Nach einer sehr kurzen, festen und bekannten Zeit wird ein zweiter Puls ins Wasser abgestrahlt und die Echos werden in die gleichen Zeit-/Raumfenster einsortiert. Durch die Kreuzkorrelation der einzelnen Zeit-/Raumfenster entsprechend der Gleichung

$$\varphi_{f,g}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} f(t)\cdot g(t+\tau)\, dt$$

oder in digitaler Form

$$\varphi(\Delta T) = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i \cdot g_i(\Delta T)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} f_i^2 \sum_{i=1}^{N} g_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_i \cdot g_i(\Delta T)}{N^2}$$

mit
f = Echofunktion des digitalen Bildes 1
g = Echofunktion des digitalen Bildes 2

lässt sich die zeitliche Bewegung der Streuer in jedem Zeit-/Raumfenster bestimmen. Unter Berücksichtigung des Einstrahlwinkels und der Zeit zwischen 2 Pulsen lässt sich eine Geschwindigkeitsverteilung entlang des Ultraschallstrahls bestimmen. Mit dieser Methode erlaubt das Messgerät die Geschwindigkeitsbestimmung in bis zu 16 Messfenstern mit einer Größe ab 1 cm; die exakte Messfenstergröße ist geometrieabhängig und variabel, sie kann bis zu 10 cm betragen.

Die Beurteilung des Geschwindigkeitsprofils erlaubt sofort die Abschätzung der erzielbaren Genauigkeit bei der Durchflussbestimmung; die Genauigkeit wird bei vollentwickelten Profilen viel höher sein als bei gestörten Profilen.

Die Geschwindigkeitswerte werden genutzt, um den Durchfluss in voll- und teilgefüllten Rohren und in Kanälen zu bestimmen. In vollgefüllten Rohren sind die Geschwindigkeitsprofile bekannt (FIEDLER 1992) und erlauben eine einfache Bestimmung des Durchflusses. Bei Teilfüllungen in Rohren und Kanälen wird eine zusätzliche Höhenmessung benötigt; aus dieser wird über die Geometriedaten der durchströmte Querschnitt bestimmt. Deshalb enthält der Sensor einen Ultraschallsensor, der aus einer Laufzeitmessung eines Ultraschallpulses zur Wasseroberfläche die Höhe bestimmt, sowie einen weiteren hydrostatischen Sensor, der ebenfalls den Füllstand misst. Auch die Nutzung eines externen Füllstandssensors ist möglich. Durch die Wahl der Höhenmessung können applikative Gegebenheiten ideal berücksichtigt werden. Die Höhenmessung dient gleichzeitig dazu, die Lage der Zeit-/Raumfenster festzulegen. Wie sich aus diesem Geschwindigkeitsprofil der Volumenstrom ableiten lässt, soll hier nicht beschrieben werden; einige Informationen hierzu finden sich in früheren Veröffentlichungen (TEUFEL 2006).

2.3 Benutzung der Kreuzkorrelation bei größeren Abmessungen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Kreuzkorrelation des OCM *Pro* CF hat eine wesentliche Limitation; die maximale Füllstandshöhe bis zu der dieses Gerät Geschwindigkeiten bestimmen kann, beträgt 1,00 m oder 1,50 m entlang des Messstrahls. Für größere Abmessungen müssen numerische und/oder empirische Daten herangezogen werden, um die Geschwindigkeitsmessungen des ersten Meters zu ergänzen.

Diese Begrenzung resultiert aus einer Dekorrelation der beiden Pulse in größerem Abstand. Um ein Übersprechen der Signale zu vermeiden, wird der zweite Puls erst abgestrahlt, wenn alle Informationen des ersten Pulses gesammelt sind; damit wächst die benötigte Zeit zwischen den Pulsen mit größerem Abstand. Als zweite Limitation ist zu nennen, dass die Intensität der reflektierten Echos mit größerer Entfernung entsprechend der normalen Wellenausbreitung mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt. Beide Effekte, größerer Zeitabstand zwischen den Pulsen und geringere Intensität, führen zu einer schlechteren Korrelation; das heißt einer schlechteren Geschwindigkeitsbestimmung.

In einem ersten Schritt wurden Keramiken mit einem größeren Durchmesser benutzt; zum einen enthält der Ultraschallstrahl damit eine höhere Intensität, zum zweiten reduziert sich die Apertur umgekehrt proportional zum Durchmesser; beides führt zu deutlich höherer Intensität in größerem Abstand. In einem weiteren Schritt wurde die Variante für den nicht explosionsgefährdeten Bereich ausgelegt, um diesbezügliche Intensitätslimitationen zu vermeiden.

Die Verkürzung der Zeit zwischen zwei Pulsen bei gleichzeitig klarer Trennung der beiden Pulse gestaltet sich schwieriger. Nach einigen Versuchen zeigten sich „Chirp-kodierte“ Pulse als geeignet. Die folgende Formel beschreibt einen Puls:

$$U = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

wobei U die Amplitude des Ultraschallwelle ist, ω die Abstrahlfrequenz und t die Laufzeit. Bei „Chirp-Pulsen“ ist ω keine Konstante mehr, wie das für einen „normalen“ Puls der Fall ist, sondern hängt von der Zeit ab. Ein linearer Chirp lässt sich z. B. beschreiben durch

$$\omega = \omega_0 + k \cdot t$$

mit ω_0 und k als konstanten Werten. Die Abbildung 4 zeigt einen „linearen up-“ und „down-“Chirp im Vergleich zu einem „normalen“ Plus:

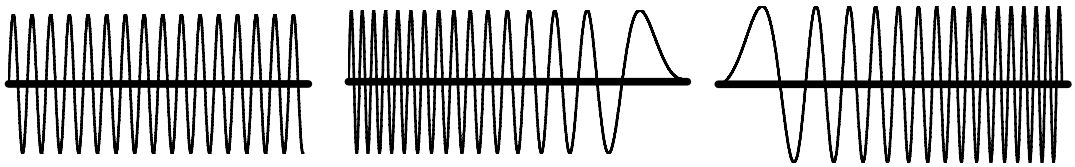


Abb. 4: „Normaler” Ultraschallpuls, „up-Chirp“, „down-Chirp“

Um mit Chirps arbeiten zu können, müssen (Keramik-)Wandler genutzt werden, die eine breitbandige Anregung erlauben. Auch das (Empfangs-)Filter muss an die Frequenzbedingungen angepasst sein; dies ist allerdings mit digitalen Filtern möglich. Idealerweise sind die Chirps zueinander orthogonal, da dann eine gute Trennung ohne Übersprechen möglich ist. Diese ideale Orthogonalität ist in der Praxis gestört, da die Frequenzantwort des Pulses durch die $3/4 \cdot \lambda$ Anpassschicht und die Einkopplung ins Wasser modifiziert ist.

Neben der verbesserten Korrelation hat der Pulse auch eine höhere Intensität in dem Ultraschallpuls; somit kann auch bei größeren Abständen zuverlässig gemessen werden.

3 Erste Anwendungen des OCM Pro LR

Erste Verifikationsmessungen fanden in unseren eigenen Versuchsständen statt. Da Versuchsstände mit den benötigten Wassertiefen von mehr als 1 m nicht üblich sind, wurde die bestehende Messstrecke und der Überprüfungstest modifiziert. Damit konnte keine Durchflussmessung überprüft werden, aber der Test erlaubte die Verifizierung des Geschwindigkeitsprofils. Die Abbildung 5 skizziert den Aufbau. Die Abmessungen des Testkanals betragen ca. 0,34 m x 0,70 m x 10,00 m. Der Sensor wurde so befestigt, dass er entlang des Kanals misst mit einer Pfadlänge von fast 10 m. Durch zwei Halbschalen konnte der durchströmte Querschnitt eingeengt werden; an dieser Stelle lag dementsprechend nach Bernoulli eine höhere Geschwindigkeit vor. Da die Halbschalen verschoben werden konnten, war es möglich, Geschwindigkeitsänderungen entlang des gesamten Ultraschallstrahls zu beobachten und gegen eine Vergleichsmessung zu überprüfen. Dieser einfache Test zeigte eine hervorragende Übereinstimmung der Geschwindigkeitsmessungen mit der Überprüfung.

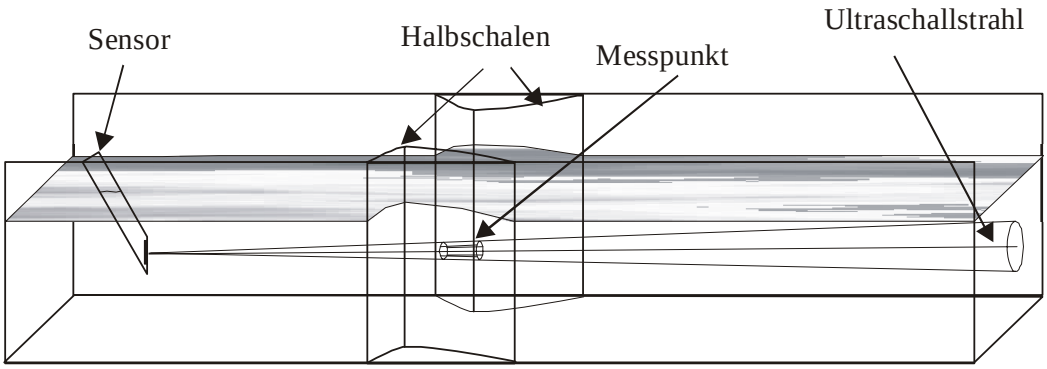


Abb. 5: Testaufbau *OCM* Pro *LR*

Mittlerweile zeigen einige Installationen des Gerätes den potenziellen Einsatzbereich auf. Die Applikationen reichen von dem Kläranlagenzulauf von London mit sehr hoher Verschmutzung und Sedimentation. Zur genauen Durchflussmessung wurde eine Schwimmerlösung realisiert, die die Höhe der Sedimentation bestimmt und damit den korrekten Fließquerschnitt berücksichtigt. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt von oben nach unten. Die Abbildung 6 zeigt die Realisierung.

Abb. 6: Schwimmerlösung im Zulauf zur Kläranlage London

Aber auch sehr sauberes Wasser im Kläranlagenauslauf von Hamburg lässt sich problemlos vermessen. In einer weiteren Untersuchung wurde der OCM *Pro* LR zur Geschwindigkeitsprofilbestimmung der Einlaufströmung in ein Sedimentationsbecken genutzt, diese Ergebnisse werden in einem kommenden Paper veröffentlicht.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Bericht beschreibt die Weiterentwicklung von Ultraschall-Dopplersystemen zur Geschwindigkeits- und Durchflussmessung mit einer erweiterten Auswertung durch die Kreuzkorrelation. Diese wurde bisher als Geschwindigkeitsmessmethode vor allem im Bereich kleinerer und mittlerer Abmessungen bzw. Geometrien eingesetzt und ergänzt und erweitert somit die bereits seit Jahren erprobten ADCP-Systeme. Mit codierten Pulsfolgen konnte der Messbereich deutlich erweitert werden. Durch die Kreuzkorrelation werden deutlich feinere Auflösungen erreicht als mit der Dopplertechnik und erzielbare Genauigkeiten werden vor allem bei kleinen Geschwindigkeiten höher.

Das Messverfahren wird auch zur direkten Durchflussbestimmung genutzt. Dort bietet es gegenüber einfachen Dopplersystemen deutlich höhere Genauigkeiten, die räumliche Zuordnung der gemessenen Geschwindigkeit erlaubt eine Kalibrierung des Messsystems, was mit Dopplersystemen in der Regel nicht möglich ist. Erste Applikationen arbeiten von sauberem bis stark verschmutztem Wasser und bei Geometrien bis hin zu mehreren Metern. Neue Entwicklungen konzentrieren sich derzeit auf die vektorielle Geschwindigkeitsbestimmung und die Erfassung größerer Teile des Fließquerschnittes.

Literatur

FIEDLER, O.: Strömungsmesstechnik und Durchflussmesstechnik, Oldenburg, München, 1992

JENSEN, J. A.: Estimation of blood velocities using ultra sound; Cambridge, University Press, 1996

LEFHALM, C.-H.: Qualifizierung von Messtechniken zur Erfassung von Strömungsgrößen in flüssigen Schwermetallen; Dissertation Universität Karlsruhe, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, urn:nbn:de:0005-071111; ISSN 0947-8620; 2005

LUCAS, S.: The use of new flow measurement technology, International Environmental Technology, September/October 2003; p. 16.

TEUFEL, M.: Doppler-Verfahren, Pulsdoppler und Kreuzkorrelation bei Ultraschallmessungen; Seminar: Neue Entwicklungen in der Durchflussmessung in natürlichen und künstlichen Gerinnen; TU München, März 2004

TEUFEL, M.: Durchflussmessung mit Kreuzkorrelation; KA – Abwasser, Abfall 2006 (53) Nr. 7

Kontakt:
Dr. Michael Teufel
Fa.: NIVUS GmbH
Im Täle 2
75031 Eppingen-Mühlbach
Tel.: 07262/ 91 91 - 801
Fax: 07262/ 91 91 - 999
Michael.Teufel@nivus.com
www.nivus.de

1987 Diplom in Physik
Universität Bielefeld

1987 Promotion im Chemie-Ingenieurwesen
Lehrstuhl für Strömungsmechanik,
Universität Erlangen-Nürnberg
Thema: Durchflussmesstechnik

Tätig für einige Durchflussmessgerätehersteller:
Bopp&Reuther, Elster, Yokogawa, ETA, ...

Fachreferent seit 1990 beim VDI bzgl. Durchflussmessungen in Rohrleitungen;
Themen: Wirbelzähler, anlage-/einbaubedingte Strömungsstörungen, Korrelationsmesstechnik, Ultraschall

Bei der Fa. NIVUS GmbH
seit 2003: Leiter Produktmanagement und Entwicklung
seit 2008: Leiter Abteilung Technologietransfer

Wichtige Kooperationen:
u. a. FH Münster, Universität Straßburg, TU Chemnitz, FZ Karlsruhe

OTT ADC – modernste Strömungsmesstechnik für die klassische Durchflussmessung nach dem Lotrechtenverfahren

Stefan Siedschlag

1 Einleitung

Die klassische Durchflussmessung nach dem Lotrechtenverfahren ist neben der Schwimmermessung eine der ältesten hydrometrischen Messmethoden. Sie wird seit über 200 Jahren im gewässerkundlichen Routinemessdienst angewendet. Ihre detaillierte Beschreibung kann der hydrologischen Fachliteratur und einschlägigen Regelwerken entnommen werden (Pegelvorschrift, Anlage D, 1992; EN ISO 748, 2000; RANTZ et al. 1982). Die Messung der Fließgeschwindigkeit erfolgt dabei auch heute noch überwiegend mit hydrometrischen Flügeln. Flügelmessungen haben jedoch ihre natürlichen, durch das mechanische Prinzip bedingten Einsatzgrenzen (z. B. Anlaufgeschwindigkeit der Schaufel, keine Erkennung von Rückströmung und weitere). Erst durch die Nutzung alternativer physikalischer Messprinzipien (magnetisch-induktiv, akustisch) konnten diese Grenzen in den zurückliegenden Jahren schrittweise überwunden werden. Als traditioneller Hersteller hydrometrischer Messgeräte stellt OTT Messtechnik dem gewässerkundlichen Messpersonal mit dem OTT ADC (**A**coustic **D**igital **C**urrent Meter) nunmehr ein modernes akustisches Strömungsmessgerät für die Messung von Punktgeschwindigkeiten in offenen Gerinnen (z. B. Flüssen, Bächen, Bewässerungskanälen etc.) zur Verfügung. Diese verbindet in hervorragender Weise die traditionelle Methode des Lotrechtenverfahrens mit der Nutzung innovativer Technologien zur Messung von Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe. Dabei garantieren bewährte akustische Messprinzipien in Kombination mit modernsten Verfahren zur Signalauswertung die Verfügbarkeit präziser und zuverlässiger Messergebnisse. Die integrierte Automatisierung vieler gewohnter Arbeitsschritte schafft ein hohes Maß an Datensicherheit und Messqualität.

2 Beschreibung des Messgerätes

Der OTT ADC besteht aus zwei Basiskomponenten, dem Sensor und dem Bediengerät. Beide werden über eine Sensoranschlussleitung miteinander verbunden und mit Hilfe flexibler Adapter an herkömmlichen Messstangen montiert. Der Sensor ist das Basiselement des Gerätes. In ihm sind alle wichtigen zur Messung von Fließgeschwindigkeit, Wassertiefe und Temperatur notwendigen Baugruppen untergebracht. Abb. 1 zeigt den Sensor bei der Messung einer oberflächennahen Geschwindigkeit.

Abb. 1: OTT ADC bei der Messung einer oberflächennahen Geschwindigkeit

Mit dem OTT ADC können Fließgeschwindigkeiten von – 20 cm/s bis 2,40 m/s bei einer Genauigkeit von 1% des gemessenen Wertes ± 2,5 mm/s gemessen werden. Die Einhaltung dieser extrem hohen Genauigkeitsanforderung über den gesamten Messbereich wurde durch eine ISO-normgerechte Prüfung (ISO 3455, 2007) im Eichkanal der unabhängigen niederländischen Forschungsanstalt „WL I delft hydraulics“ bestätigt und zertifiziert (Abb. 2).

Carriage velocity (m/s)	ADC reading (m/s)	deviation (%)
-0.200	-0.198	-1.0
-0.100	-0.097	-3.0
0.100	0.099	-1.0
0.200	0.197	-1.5
0.500	0.498	-0.4
0.750	0.748	-0.3
1.000	0.998	-0.2
1.250	1.249	-0.1
1.500	1.500	0.0
1.750	1.753	0.2
2.000	2.006	0.3
2.200	2.207	0.3
2.400	2.404	0.2

Table 1. Velocity calibration results

Calibrated by J. van der Pot

Approved by B.W.G. Blok

Abb. 2: OTT ADC - Zertifikat über die Messgenauigkeit im Eichgerinne der WL I delft hydraulics

Die eigentliche Messung der Geschwindigkeit erfolgt in einem 10 cm vor dem Sensorkopf befindlichen Messvolumen (Abb. 3).

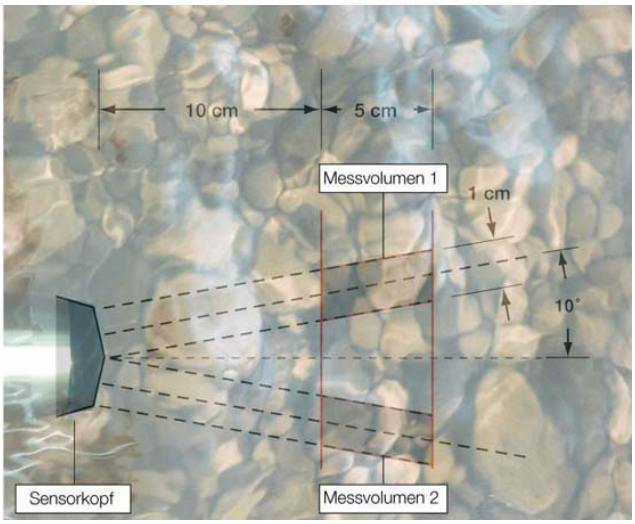


Abb. 3:
OTT ADC – schematische Darstellung des Messvolumens

Zwei Ultraschallwandler senden gleichzeitig Signale gegen die Fließrichtung aus. Diese werden an den im Wasser befindlichen Partikeln (Schwebstoffe, Luftblasen, Plankton etc.) reflektiert. Abhängig von Größe und Form der Partikel kehrt ein Echosignal zu den Wandlern zurück, wird empfangen und anschließend im DSP (Digitaler Signal Prozessor) als Echomuster digitalisiert. Nach einer kurzen Pause wird der Vorgang wiederholt, so dass ein zweites Echomuster entsteht. Der DSP prüft daraufhin beide Muster mit Hilfe der Kreuzkorrelation auf Ähnlichkeit. Das Ergebnis der mathematischen Funktion lässt Rückschlüsse auf den zeitlichen Versatz beider Echomuster zu. Dieser wird anschließend für die Berechnung der Fließgeschwindigkeit verwendet. Verschiedene interne Qualitätsprüfungen sichern zu jeder Zeit die Zuverlässigkeit der gemessenen Daten.

Zusätzlich ermöglicht eine im Sensorkörper integrierte Druckmesszelle die automatische Ermittlung der Wassertiefe an der Messlotrechten sowie der Eintauchtiefe des Gerätes in einem Messbereich von 0 bis 5 m. Alle wichtigen Messdaten werden auf dem grafischen Display eines leichten, wetterfesten und handlichen Bediengerätes angezeigt (Abb. 4).

Abb. 4:
OTT ADC – Bedieneinheit mit grafischem Display und Folientastatur

Das Bediengerät ist die Schnittstelle zwischen Anwender und Sensor. Es bietet im Messbetrieb einen vollen Überblick über alle systemrelevanten Funktionen (z. B. grafische Veranschaulichung von Sensorposition und –bewegung, Lage der aktuellen Messlotrechten, Datenqualität usw.). Der Anwender gibt über die Folientastatur des Bediengerätes alle erforderlichen Parameter zu Messstelle und Messverfahren ein. Hierbei kann er zwischen elf standardisierten Geschwindigkeitsmethoden (Tabelle 1) sowie zwei Durchflussberechnungsmethoden (MEAN – und MID Section – Verfahren nach EN ISO 748) wählen.

Tabelle 1
Übersicht der Auswahl an Geschwindigkeitsmethoden im OTT ADC

Methode	**Lage der Messpunkte**
1 – Punktmessung	0,6 • h (h = Lotrechtentiefe)
2 – Punktmessung	0,2 / 0,8 • h
3 – Punktmessung	0,2 / 0,6 / 0,8 • h
4 – Punktmessung	0,2 / 0,4 / 0,7 / 0,9 • h
5 – Punktmessung	oberflächennah / 0,2 / 0,6 / 0,8 • h / sohlnah
6 – Punktmessung	oberflächennah / 0,2 / 0,4 / 0,6 / 0,8 • h / sohlnah
2 – Punktmessung nach KREPS	oberflächennah / 0,62 • h
1 – Punkt – Eismessung	0,5 • $h_{effektiv}$
2 – Punkt – Eismessung	0,2 / 0,8 • $h_{effektiv}$
Oberflächen 1 – Punkt – Messung	oberflächennah
Vielpunktmessung	Anzahl und Lage der Messpunkte werden frei gewählt

Eine benutzerfreundliche Software führt ihn Schritt für Schritt von Ufer zu Ufer, gibt Empfehlungen zur Lage der Lotrechten und Messpunkte und ermittelt automatisch den Durchfluss am Ende jeder Messung. Die Spannungsversorgung des Gerätes wird über im Bediengerät eingebaute wiederaufladbare Batterien sichergestellt. Diese umweltfreundliche Lösung stellt bei voller Ladung mehr als 20 Stunden Messbetrieb sicher. Mit über 500 Ladezyklen ist eine lange Batterielebensdauer garantiert. Über einen Ladeadapter für 12 V (Kfz-Anschluss) ist es möglich, das Gerät auch unterwegs auf der Fahrt zur Messstelle aufzuladen. Alle Messungen werden in Dateien auf dem Bediengerät gespeichert und sind über ein USB-Kabel mit Hilfe der Qreview-Software auf einen PC übertragbar. Die Software bietet eine unkomplizierte Datennachbearbeitung (z. B. Änderung der Berechnungsmethode), die grafische Visualisierung der Messergebnisse (z. B. Geschwindigkeitsflächen) sowie den Datenexport im ASCII oder XML-Format. XML-Dateien lassen sich problemlos in die Datenbanken der kommerziellen Auswerteprogramme SoftwareQ (www.wasserundumwelt.de) und BIBER (www.kisters.de) importieren.

3 Einsatz im Feld

Der OTT ADC ist für den Einsatz an herkömmlichen Flügelstangen und Überschubgestängen geeignet. Die Geräteausführung in drei unterschiedlichen Kabellängen (2,5 m / 6 m und 10 m) gestattet sowohl Messungen im freien Profil als auch von Brücken und Messstegen (Abb. 5).

Abb. 5: OTT ADC im Messeinsatz vom Messsteg und im freien Profil

Das Bediengerät kann mit einem Universaladapter an Stange oder Überschubrohr befestigt werden. Damit sind Messungen problemlos von Einzelpersonen durchführbar. Messen, Speichern, Auswerten und Übertragen der Daten erfolgen automatisch. Das aufwändige Erstellen von schriftlichen Messprotokollen im Feld entfällt ebenso wie die manuelle Berechnung von Wassertiefen und Messpunktlagen. Messdaten müssen nicht mehr anschließend von Hand in die Auswerteprogramme eingegeben werden. Bekannte Fehlerquellen sind damit ausgeschaltet und die Qualität von Durchflussmessungen wird spürbar verbessert. Zudem erlaubt die Messung negativer Geschwindigkeiten eine Verwendung des Gerätes in Messquerschnitten, die durch Rückströmeffekte beeinflusst werden. Durch die kompakte Bauform lassen sich sowohl oberflächennahe (2 cm unter Wasserspiegel) als auch sohlnahe (2 cm über Sohle) Geschwindigkeiten zu messen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der OTT ADC zeichnet sich durch seine einfache Handhabung bei einem Höchstmaß an Funktionalität aus. Er ist auf die Erfordernisse des täglichen gewässerkundlichen Routinemessbetriebes ausgerichtet und wird damit den wachsenden Anforderungen an eine zeitnahe Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Messergebnisse gerecht. Als jüngstes Mitglied in der Familie akustischer Strömungssensoren hat seine Zukunft gerade erst begonnen. Durch die hochwertige Ausführung des OTT ADC sind nur wenige Wartungsarbeiten notwendig, welche sich im Wesentlichen auf eine pflegliche Behandlung und sorgsame Reinigung nach Gebrauch beschränken. Turnusmäßige Neukalibrierungen des Sensors, wie vom Messflügel her bekannt, sind nicht erforderlich. Das spart definitiv Kosten für Unterhalt und Betrieb.

Literatur

EN ISO 748: Durchflussmessung in offenen Gerinnen – Geschwindigkeitsflächen – Verfahren, Ausgabe: März 2000, Berlin: Beuth Verlag

ISO 3455: Hydrometry - Calibration of current-meters in straight open tanks, Ausgabe 2007

Pegelvorschrift, Anlage D: Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen, Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und der Bundesminister für Verkehr (BMV), Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 1992

RANTZ, S. E. et al.: Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge, Geological Survey Supply Paper 2175, Washington: US Government Printing Office, 1982

Kontakt:
Dipl.-Ing. Stefan Siedschlag
OTT Messtechnik GmbH & Co. KG
Außenstelle Berlin
Albrecht-Dürer-Str. 28
12623 Berlin
Tel.: 030/ 83 22 63 71
Fax: 030/ 84 72 63 56
s.siedschlag@ott.com

1981 – 1986
Studium TU Dresden, Sektion Wasserwesen
Abschluss: Diplomingenieur

bis 1998
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin

- Prüfung und Beurteilung von Durchflussmessmethoden und –geräten
- Durchführung von Fortbildungsseminaren
- Hydrologische Gutachten

1998 – 2001
Quantum Hydrometrie GmbH

- Applikation von Ultraschall-Laufzeit-Systemen
- Durchführung von Kundenschulungen

seit 2002
OTT MESSTECHNIK GmbH & Co KG

- Business Development Manager für den Geschäftsbereich Durchflussmesstechnik
- Applikationen mobile und stationäre Durchflussmesstechnik
- Kundenberatung und -training

Mitglied der AG „Hydrometrie“ beim DWA

Mitglied des Normenausschusses Wasserwesen, Arbeitsausschuss „Hydrometrie“ im DIN

Mehrpfad-Ultraschalllaufzeitmessung in natürlichen Fließgewässern

Sebastian Fischer

Abstract

Die Mehrpfad-Ultraschalllaufzeitmessung ist ein seit Jahren bewährtes Verfahren für Durchflussmessungen in der Hydrologie, wobei die Methode ausführlich in der ISO6416 beschrieben und die Berechnungsgrundlagen dargestellt sind.

Die von hydrologischen Einrichtungen wie Wasser- und Schifffahrtsämtern gewünschten Anwendungen im natürlichen Fließgewässer stellt hier in vielerlei Hinsicht eine große Herausforderung für die Messtechnikhersteller dar. Gründe für messtechnische Probleme bei Freispiegelmessungen sind u. a. die meist großen akustischen Pfadlängen, Signalreflexionen an Thermalschichten und die vor allem bei flachen und/oder langsam fließenden Gewässern auftretende Verkrautung, die das Signalübertragungsverhalten der Messeinrichtungen negativ beeinflussen und eine stabile Durchflussmessung verhindern kann.

In diesem Vortrag werden die Erfahrungen des im Gebiet des Wasserwirtschaftsamts Hannoversch-Münden an der Eder installierten Ultraschall-Durchflussmesssystems diskutiert.

Darüber hinaus wird im Rahmen dieses Vortrags aufgezeigt, wie durch die gewählte Installationshöhe der unterschiedlichen Messpfade die Messgenauigkeit optimiert werden kann.

Kontakt:
Sebastian Fischer
systec Controls
Mess- und Regeltechnik GmbH
Lindberghstraße 4, 82178 Puchheim
Tel.: 089/ 80 90 6 180
Fax: 089/ 80 90 6 200
sebastian.fischer@systec-controls.de

A Commercial Multi-Frequency Acoustic Backscatter Instrument for Profiling of Suspended Sediment Size Distribution and Load

Andrew M. Smerdon

Abstract

Single frequency profiling instruments such as acoustic Doppler current profilers provide a backscatter measurement that is used for quality control purposes. This measurement is related to the amount of material in suspension. However, to estimate suspended load reliably, intensive sampling over spatial and temporal scales is required to account for variability in particle size, upon which acoustic backscatter is strongly dependent.

By using multi-frequency, coincident acoustic beams, the particle size-dependent backscatter response of each beam can be compared to estimate mean particle size for a given measurement range cell. Once particle size uncertainty has been resolved, sediment load may then be calculated with greater confidence, and with less reliance on physical sampling.

We describe the operating principles of a commercial multi-frequency acoustic backscatter instrument, highlighting the critical measurements necessary for accurate load estimation. We outline a method of instrument calibration and present initial data to demonstrate the instrument performance.

Acoustic Measurement of Suspended Sediment

YOUNG et al. (1982) and HAY (1983) first described monitoring instruments that measured acoustic backscatter from suspended sediment, and LIBICKI et al. (1989) developed a detailed theoretical approach for the interpretation of acoustic backscatter data from a single frequency device. The technique involves transmitting a pulse of high frequency, directional, acoustic energy, typically in the range 0.5-5 MHz into the suspension, and analyzing the received signal to obtain a time series of scattered signal strength. Knowledge of speed of sound in the water allows the data to be converted into a profile of signal intensity versus range from the transmitting element. Scattered signal strength is related to the amount of material in suspension, and there has been considerable research effort to describe this relationship and thus to derive suspended load from backscatter strength.

In a series of theoretical studies of backscatter characteristics from suspended glass spheres, THORNE et al. (1993) developed a general form function for a suspension of regular shaped scatterers, which was tested against laboratory experiments. The form function describes the backscattering characteristics of the scatterers as a function of incident frequency and mean particle radius. Later work by THORNE et al. (1995) on irregularly shaped scatterers showed the general principles applied to regularly shaped scatterers with moderate size distribution is similar to a first order approximation to that of irregularly shaped scatterers, such as would be found in marine sediment. THORNE AND HANES (2002) summarised the relationship between a measured backscatter signal P and mass concentration M as follows:

$$M = \left(\frac{\mathrm{Pr}\,\psi}{K_s K_t} \right)^2 \cdot e^{4r\alpha} \tag{1}$$

where r is range from the transducer, ψ corrects for the acoustic transducer beam characteristics in the near field, α describes signal attenuation due to the suspended sediment, K_t is a system constant, derived during calibration, and K_s is given by:

$$K_s = \left(\frac{F_m}{\sqrt{a_s \rho_s}} \right) \tag{2}$$

where F_m is the sediment form function, a_s is the mean sediment radius and ρ_s is the sediment density.

The Need for Multiple Frequencies

Figure 1 shows how backscatter signal varies as a function of mean sediment diameter at four different frequencies for a fixed mass concentration. In most environments, the mean sediment size varies with time and elevation from the bed. As currents, flow velocity, wave motion, or turbulence increase, so larger particles are suspended, and when the forcing conditions reduce in magnitude, larger particles will begin to fall out of suspension, creating a particle size gradient. So to calculate K_s and therefore M, many sediment samples may be required on temporal and spatial scales to obtain F_m and a_s.

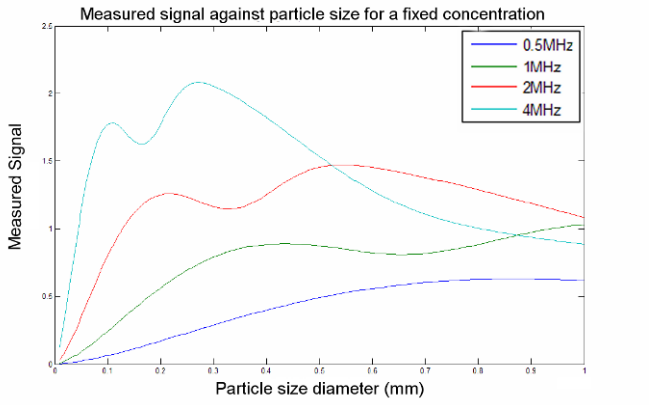


Figure 1: Backscatter dependence on particle size for a fixed concentration

With the advent of commercial acoustic Doppler current profilers in 1982 there was, for the first time, an instrument that measured backscattered acoustic signals from particles in suspension in the water column. REICHEL AND NACHTNEBEL (1994) described the use of such an instrument for suspended sediment measurement in a fluvial application, and also highlighted some of the significant limitations. Acoustic Doppler current profilers are generally

single-frequency devices, and thus as explained above, require separate measurement of the suspended sediment size to estimate mass concentration. An additional limitation is that Doppler instruments are optimised to record temporal and frequency shifts in the backscattered signal and are less well adapted to accurate and stable measurement of amplitude.

Figure 1 also shows the difference in measured backscatter signal as frequency is varied, which is due to the frequency dependency of the sediment form function. If the sediment suspension is observed with two or more frequencies and the results compared, it should be possible to derive mean particle size and thus to calculate K_s and M.

HAY AND SHENG (1992) described and tested a method of particle size determination using multi-frequency acoustic backscatter. The principle is to use the frequency dependent variation in backscatter form function for particles where $ka < 2$ (Figure 2) where a is the mean radius and k is the wave number equal to $2\pi f/c$, and c is speed of sound. For particles that lie on this sloping region for at least one frequency, and which return sufficient backscatter to be detected, a ratio between two or more frequency responses may be calculated. Figure 3 shows typical form function ratios for frequencies of 1 MHz, 2 MHz and 4 MHz. Using frequencies of 1 MHz, 2.25 MHz and 5 MHz, Hay and Sheng were able to estimate particle sizes in the range 50 µm to 170 µm to between 10% and 20%. They also noted that once the relative sensitivities of the three frequencies had been established, the calibration of the system was site independent.

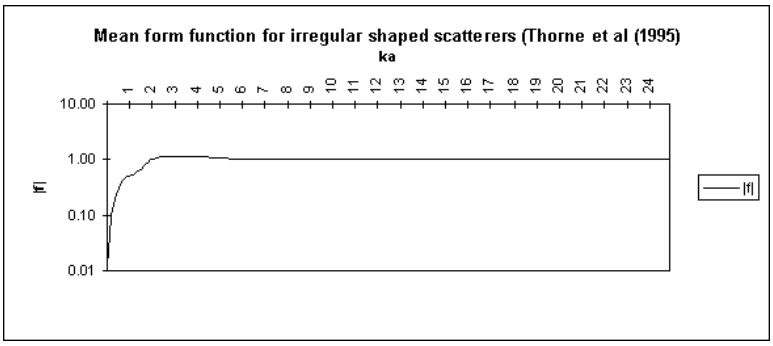

Mean form function for irregular shaped scatterers (Thorne et al (1995)
ka
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
10.00
1.00
0.10
0.01
|f|
|f|

Figure 2: Sediment form function

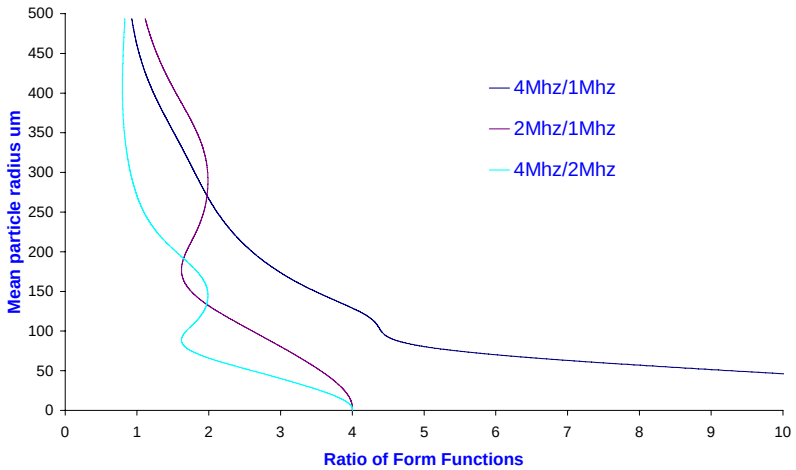


Figure 3: Ratios of form functions at different frequencies

The AQUA*scat* Instrument

In 1992, Aquatec Electronics Limited, UK, manufactured a data acquisition for a three frequency acoustic backscatter probe, similar to that described in PEARSON AND THOMAS (1991). Over the coming decade they continued to manufacture various research instruments based on these principles for institutions studying bottom boundary layer processes around the world, before PEARSON AND THOMAS's technology licensed from the UK Ministry of Agriculture, Fisheries and Food became obsolete. In 2001, Aquatec designed a new instrument using the latest available techniques, and the first AQUA*scat* was produced. The AQUA*scat* 1000, launched in 2006 is the latest evolution of the technology. Figure 4 illustrates the system arrangement.

The instrument is controlled by a digital signal processor (DSP), which also carries out signal processing and analysis. A programmable logic array is used for high frequency signal generation and filtering. In the top right hand section is the acoustic backscatter transmit and receive section. Up to four transducers are driven through a multiplexer (Mux) from amplified, digitally generated signals. The same transducers are used to receive the backscattered response, which is amplified using a linear amplifier with programmable gain and high speed, broadband data acquisition. The digitised signal is then mixed digitally down to I and Q components in the bandwidth of interest – for example 75 kHz for approximately 1 cm spatial sampling with a nominal 1500 m/s speed of sound. This approach to signal acquisition and processing results in both a stable, measurable gain and low noise, both of which aid in calibration. Data is stored on Compact Flash, and may be accessed at the end of a deployment or in real time by high speed USB, or at reduced data rates using RS232 or RS485 serial communications.

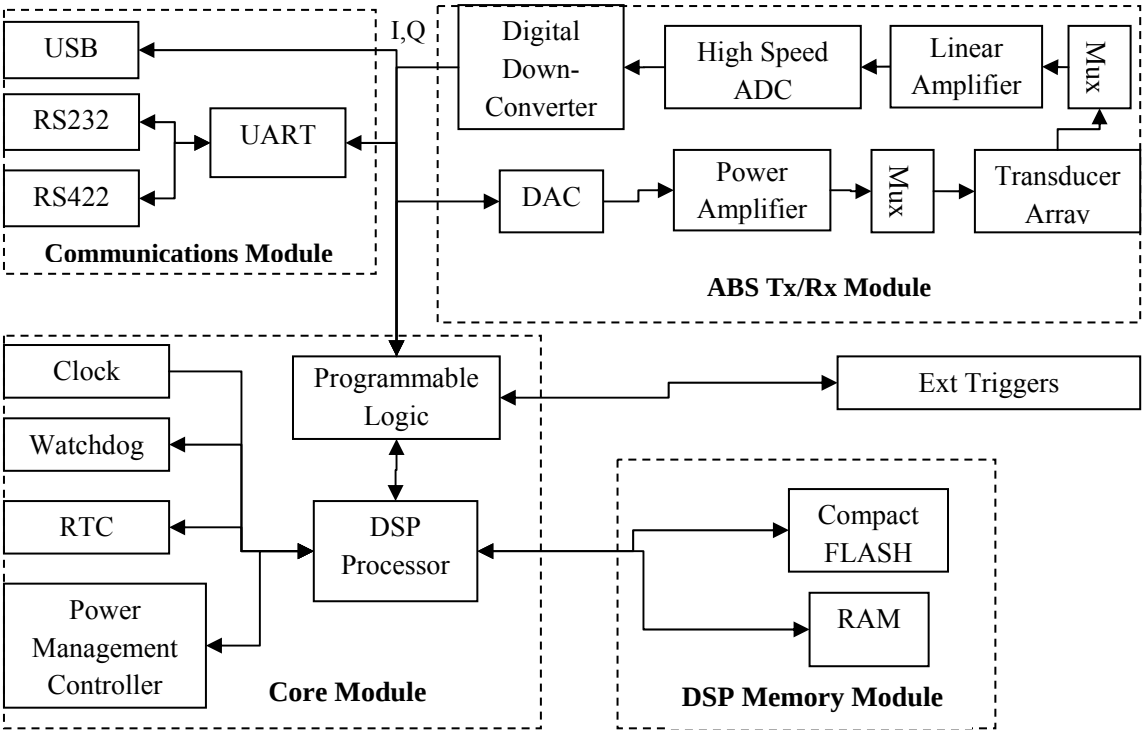


Figure 4: System Block Diagram

The instrument is pictured in Figure 5. All the electronics described above, and a battery pack for short deployments, are incorporated within the 1000 m depth rated aluminium housing. The instrument shown includes four narrow-beam acoustic transducers at frequencies between 0.5 MHz and 5 MHz, all arranged close to the instrument axis – unlike Doppler current profilers, which have divergent beams. This means that all transducers observe the same volume of water. An alternative configuration allows the transducers to be connected to the main instrument via individual cables, so they may be arranged in any orientation, so for example one transducer may be mounted obliquely to observe bedform migration, or transducers could be mounted in opposite directions to observe both upwards and downwards in the water column.

Figure 5: AQUA*scat* 1000 Instrument

Calibration

The key to successful use of acoustic backscatter for measurement of suspended sediment is an effective method of calibration. During the developmental stages of this type of instrument, there has been a strong emphasis on building calibration tanks that have a homogeneous suspension over a relatively long depth profile. Such tanks have been described by THORNE AND HANES (2002). Aquatec have designed and built a similar sediment tower shown in Figure 6.

Figure 6: Calibration Tower

The tower is 0.4 m diameter and 2.1 m deep, with a conical bottom to prevent deposition of sediment. The sediment suspension is pumped from the bottom and re-injected at two elevations. A mechanical stirrer is used to ensure mixing at the injection points. Calibrations may be carried out with either glass beads or sieved sand at a quarter phi size interval. Typically calibrations will be carried out at three sizes for each of the instrument's frequencies.

The purpose of calibration is to establish the system constant K_t described in (1) for each of the instrument's transducers. This is achieved by taking 10,000 samples of vertical backscatter profile in the sediment tower to minimise the effects of acoustic scattering variability. Pump samples are taken at a nominal height to establish actual concentration. The plots in Figure 7 illustrate the stages in the calibration process.

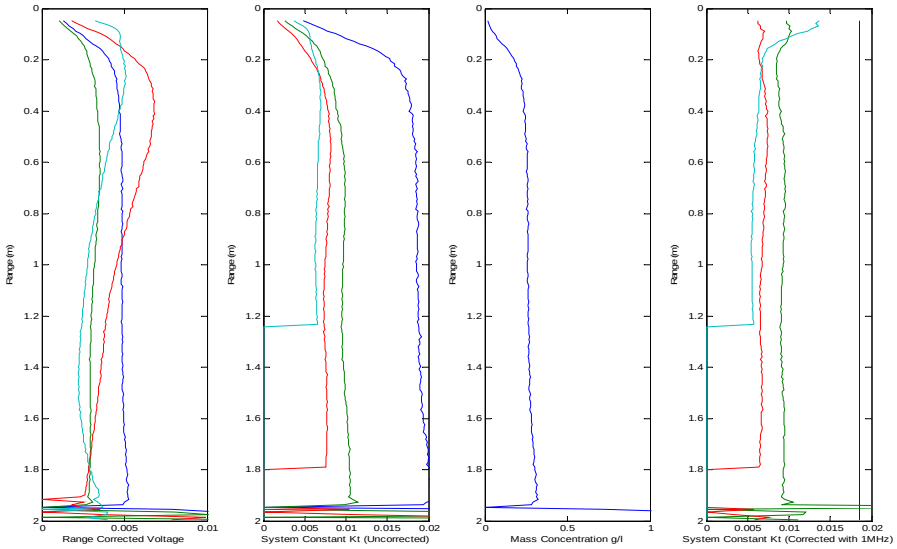


Figure 7: Calibration Plots

In the first plot, the measured signal is corrected for the effects of spreading loss and attenuation that are a function of range from the transducer. In the second plot, using the pump samples, K_t is calculated for the region around 0.6 m where pump samples were taken, assuming the tank has a constant mass concentration. Where values step to zero value, they have been discarded because the signal value is too low. In the third plot, using the frequency least affected by sediment-related attenuation (in this case the blue 1 MHz trace) the actual concentration profile is calculated. In the fourth plot, K_t is recalculated using the actual concentration profile.

The AQUA*scat* in Practical Use

When deployed, the instrument gathers acoustic profiles according to a schedule programmed by the user. The noise-like nature of the acoustic backscatter signal means that averaging is generally required to obtain usable data, and this function is carried out as part of the data acquisition process. Depending on the length of the profile, up to 100 profiles at up to 4 frequencies may be acquired, averaged and stored every second.

Some of the critical factors affecting performance of a commercial system have been described by CAINE AND SMERDON (2007), including the various trade-offs with accuracy and resolution, particle size measurement limits using the multi-frequency approach, and maximum range limits for a given concentration. As can be seen from the calibration plots, for higher frequencies, signal attenuation can limit range to less than 2 m in low concentrations. However, operation over 10 m is possible at lower frequencies.

Particle size and load inversion is carried out during post-processing. While HAY AND SHENG's method of individual frequency ratios is one practical approach, it is also possible to use all information from all available frequencies for particle size determination, with additional frequencies reducing ambiguity. An effective algorithm has been tested which

determines a least squares fit using all possible mean particle sizes for each frequency and for each range cell in the profile. Once size has been established, the mass concentration is calculated out by applying equation (1).

Figures 8 and 9 show data from the Großer Wellenkanal, Hannover in which a brief wave experiment was carried out. Transducers at 1 MHz, 2 MHz, and 4 MHz were placed 1 m above the bed. Figure 8 shows acoustic backscatter intensity on each frequency channel after correction for range attenuation and acoustic spreading. The bed shows as a high intensity red line. Figure 9 shows initial estimates for mean particle size and suspended sediment concentration. Data was processed using Matlab.

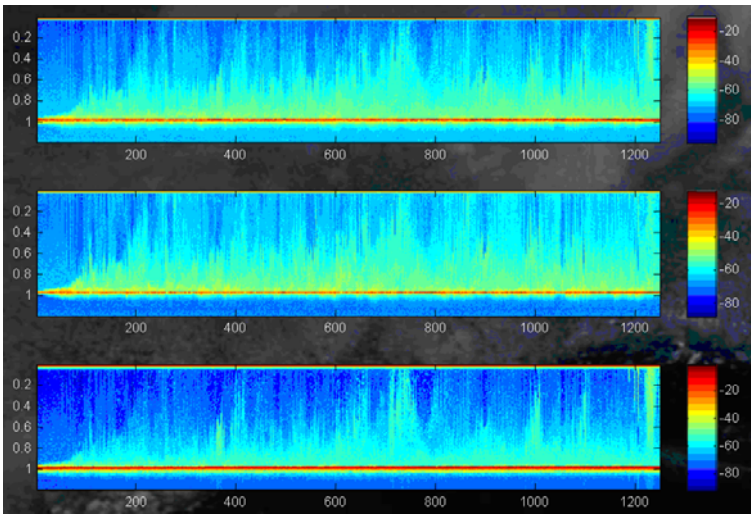


Figure 8: Range Corrected Intensity Plots

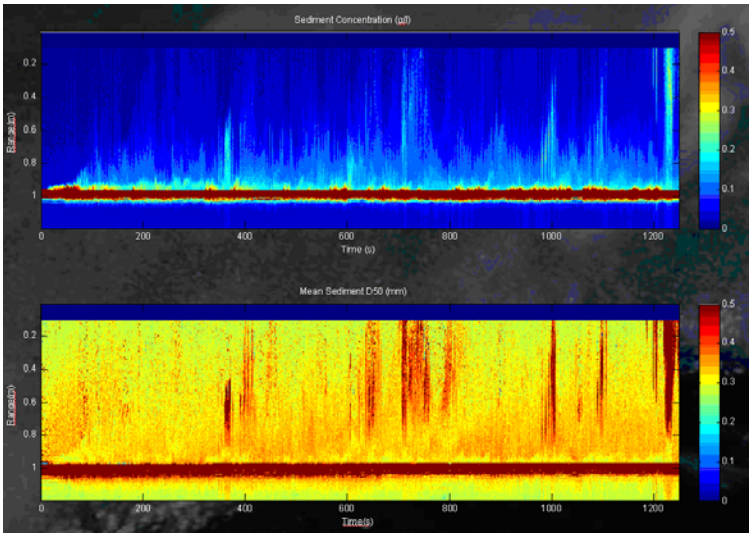


Figure 9: Sediment Load and Mean Particle Size Plots

Conclusion

We have presented the latest generation of multi-frequency acoustic backscatter profiler – a product of over a decade of suspended sediment research and instrument development. Key to its success in hydrology and oceanography is a reliable method of calibration and post-processing that allows acoustic backscatter to be inverted to suspended sediment load. This also requires both stable electronics and a suitable calibration facility such as we have described.

Continuing work with the instrument includes deployments in a number of environments to validate its performance in fluvial, benthic, and dredging applications, with a range of suspended sediment types.

Author's Note

Much of the material presented in this paper was first presented at the Hydraulics Measurements and Experimental Methods conference in Lake Placid, USA in September 2007.

References

Aquatec Group Limited (2006): AQUA*scat* 1000 Acoustic Backscatter System Data Sheet, URL: http://www.aquatecgroup.com/download/datasheet/aquascat/AQUAscat1000.pdf

CAINE S. J. AND SMERDON, A. M. (2007): The factors that affect the performance of multiple frequency acoustic backscatter instruments: the evaluation of a commercial ABS system. Proceedings of the 2nd Underwater Acoustic Measurements Conference, 2007.

HAY, A. E. (1983): On the remote acoustic detection of suspended sediment at long wavelengths. Journal of Geophysical Research, 88 (C12): pp 7525-7542.

HAY, A. E. AND SHENG, J. (1992): Vertical profiles of suspended sand concentration and size from multifrequency acoustic backscatter. Journal of Geophysical Research, 97 (C10): pp 15661-15677.

LIBICKI, C., BEDFORD, K. W., AND LYNCH, J. F. (1989): The interpretation and evaluation of a 3-Mhz acoustic backscatter device for measuring benthic boundary layer sediment dynamics. Journal of the Acoustical Society of America, 85 (4): pp 1501-1511.

PEARSON, N. D. AND THOMAS, M. R. (1991): An instrument to measure seabed boundary-layer processes. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 16 (4): pp 338-342.

REICHEL, G. AND NACHTNEBEL, H. P. (1994): Suspended sediment monitoring in a fluvial environment: Advantages and limitations applying an acoustic Doppler current profiler: Water Research: v. 28, no. 4, pp 751–761.

THORNE, P. D. AND HANES, D. M. (2002): A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. Continental Shelf Research: v. 22, pp 603–632.

THORNE, P. D., HARDCASTLE, P. J. AND SOULSBY, R. L. (1993): Analysis of Acoustic Measurements of Suspended Sediments, Journal of Geophysical Research: Vol 98(C1), pp 899-910, 1993.

THORNE, P. D., WATERS, K. R. AND BRUDNER, T.J. (1995): Acoustic measurements of scattering by objects of irregular shape. Journal of the Acoustical Society of America, 97 (1): pp 242-251.

YOUNG, R. A., MERRILL, J. T., CLARKE, T. L. AND PRONI, J. R. 1982: Acoustic profiling of suspended sediments in the marine bottom boundary layer. Geophysical Research Letters, 9 (3): pp 175-188.

Contact:
Andrew M. Smerdon CEng MIET
Aquatec Group Ltd
High Street, Hartley Wintney, Hampshire, RG27 8NY, UK
Phone: +44 1252 843072
Fax: +44 1252 843074
inquiry@AquatecGroup.com

On the use of horizontal ADCPs for discharge and sediment transport monitoring

Pim van Santen, Jeroen Aardoom, Peter Meijer

1 Introduction

Continuous measurements of river discharge has become relatively straightforward using horizontally oriented Acoustic Doppler Current Profilers (H-ADCP). Additionally, more and more experience is built up with the conversion of ADCP backscatter intensity to sediment concentrations. The potential applications are enormous for the combination of these two methods: a continuous monitoring station for total sediment discharge in a river using only one instrument. Other potential uses may be: distant dredge plume monitoring avoiding the need for close approach of the dredging ship or sediment discharge monitoring of a reservoir lake feeder channel for siltation management.
This paper studies the potential for sediment discharge monitoring using a horizontal ADCP by appreciating the measuring principles of the ADCP as well discussing the present relevant knowledge on fluvial suspended sediment dynamics.

2 Measuring principles

2.1 Discharge monitoring using horizontal ADCPs

H-ADCPs measure the current velocity vector in bins across a channel. The challenge lies in the establishment of the relationship between the discharge through the measured range and the discharge through the total cross section. In general there are two ways for establishing this relationship. The simplest method is to perform independent total discharge measurements at different discharge stages and to relate these with the specific discharge through the measured range. This results in a simple linear relationship which is however only applicable over the discharge range at which the independent measurements were performed. Consequently, the disadvantage of this method is the limited applicability at extreme discharges, either low or high.
A second method is to use a model to extrapolate the flow velocity from the measured height over the complete water depth as well as from the measured cross channel range to the sides of the channel. The used model can be as complex as possible.
The use of a theoretical velocity profile offers a quite robust but simple method for quasi-steady situations like tideless fluvial environments. The use of a velocity profile does not

need a correlation with total discharge measurements and is therefore also applicable to high discharge events.
We use the concept introduced by COLES (1956) in our H-ADCP software ViSea-H, which combines the law of the wake with the law of the wall.

$$u = A_1 u_h \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + A_2 u_h F\left(\frac{z}{h}\right) \quad (1)$$

in which: u is the current velocity at height z, u_h is the water surface current velocity, z_0 is the zero-velocity level ($z_0 = 0.03k_s$), k_s is the Nikuradse effective roughness height, A_1 and A_2 are dimensionless variables.
The perturbation profile F(z/h) is represented by

$$F\left(\frac{z}{h}\right) = 2\left[\frac{z - z_0}{h - z_0}\right]^t - \left[\frac{z - z_0}{h - z_0}\right]^{2t} \quad (2)$$

in which t is a coefficient.
It can be seen that if A_2 is set to zero, a standard logarithmic profile is obtained. Local accelerations can be represented with perturbations to the logarithmic velocity profile. These will have to be established with independant discharge measurements.
For the extrapolation to the side of the channel we assume that the flow velocity shows a logarithmic decay to the sides of the channel
During a high discharge event, extensive floodplains far outside the H-ADCP measurement range may flood. In this case it may be necessary to couple the measurements to a hydrodynamic model that computes the velocity field through the complete cross section and is real-time calibrated to the measurements.

2.2 Sediment concentration measurements using acoustics

The sound emitted by the ADCP is scattered back by particles suspended in the water column. The strength of the backscattered signal is recorded by the ADCP and can be used as a measure for the sediment concentration.
The backscatter signal needs to be converted to obtain the Target Strength using the sonar equation:

$$EL = SL - TL + TS \quad (3)$$

in which: EL is the echo level, which is the backscatter intensity measured by the ADCP, SL is the source level, TL is the transmission loss, caused by beam spreading and sound absorption, and TS is the target strength indicating the scattering properties of the sediment.
Since most particles suspended in natural streams are much smaller than the wave length of the general operating frequencies of ADCPs, the scattering falls in the Rayleigh regime. This means that the sound waves bend around and are hardly affected by the particles. Sound scatters from particles if there is a difference of the elasticity and/or the density between the particle and the medium.
The target strength is the acoustic cross section expressed in the dB domain. The acoustic cross section of a single particle in the Rayleigh regime reads as:

$$\sigma_{bs} = A\zeta = \frac{(ka)^4}{\pi}\left(\frac{e-1}{3e} + \frac{g-1}{2g+1}\right)^2 \pi a^2 \quad (4)$$

In which A is the particle area, ζ is the particle scattering function, k is the wave number ($2\pi/L$), a is the particle radius, e is the ratio of particle to water elasticity and g is the ratio of the density of the particle to the water. The backscatter of multiple particles simply add resulting in the volume backscattering strength:

$$s_v = \sum_i \sigma_{bs} N_i \tag{5}$$

Where N is the number of particles which can be written as

$$N = \frac{C}{\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_s} \tag{6}$$

In which C is the mass concentration of suspended sediment and ρ_s is the sediment density. Merging the equations and writing in the dB domain results in :

$$TS = 10\log_{10}\left(Ck^4 a^3 \left(\frac{e-1}{3e} + \frac{g-1}{2g+1} \right)^2 \frac{3}{4\pi\rho_s} \right) \tag{7}$$

This shows that when the obtained TS from ADCP measurements is correlated with the logarithmic of sediment concentration values obtained from water samples, the following theoretical relationship is obtained when everyting but the concentration is constant:

$$\log_{10}(C) = 0.1TS + B \tag{8}$$

However, in general, sediment concentration and grain size are positively correlated. As shown by equation 7, grain size also strongly influences the backscatter intensity. An increase in TS is therefore often caused by an increase in sediment concentration as well as an increase in grain size. This results in the theoretical value of 0.1 in equation 8 often being lower at around 0.04-0.05 (e.g. MAUSHAKE 2008, HOITINK & HOEKSTRA 2004).

2.3 Sediment discharge monitoring using horizontal ADCPs

Main challenge of the monitoring of sediment discharge using a H-ADCP is the relation between the truly measured sediment discharge and the total discharge through the cross-section. Like with water discharge monitoring with an H-ADCP, the relationship could be made using an indexing method, or by fitting a theoretical concentration profile.
The indexing method requires thorough calibration measurements at different discharge stages cq. tidal stages. The profile method could lead to more stable results, however in tidal settings, sediment concentration profiles may divert from theoretical profiles.
Theoretical concentration profiles are generally based on the diffusion equation which reads as:

$$Cw_s + \varepsilon_s \frac{dc}{dz} = 0 \tag{9}$$

This assumes that in steady situations, there is a balance between a downward sediment flux by gravity expressed in the sediment fall velocity (w_s) and an upward sediment flux by diffusion expressed in the sediment diffusivity (ε_s). The sediment diffusivity is a term for the ability of the flow to mix the sediment. In general the sediment diffusivity is assumed to be equal to the eddy diffusivity, the term representing the mixing of momentum:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \kappa u_* z \tag{10}$$

where κ is the von Karman constant, generally set at 0.4 and u_* is the shear velocity.

Both the fall velocity and the shear velocity are difficult parameters to predict. Both need to be obtained from detailed measurements at the monitoring site.

3 Measurement results

Aqua Vision has installed H-ADCP stations at several locations in the Saone and Rhone rivers in France. At the station Tricastin, in a side channel of the Rhone, south of Montelimar, total discharge measurements were performed over a discharge range of 400-2000 m^3/s. These measurements show that the horizontal ADCP overestimated the discharge at high discharge stages (Abb. 1). The actual cause for this apparent overestimation was the underestimation of the discharge by the total discharge measurements. The total discharge was measured using ADCP transect measurements, which were influenced by a so called "moving bottom effect" during the high discharge measurements. This means that the river bed is mobile resulting in a disturbance of the the botom-track measurements. This results in the misinterpretation of the boat speed and underestimated measured water velocities.
The measured discharge through the H-ADCP measurement range was vertically extrapolated using a logarithmic profile without a perturbation profile. LE COZ (2007) showed that for the St-Georges station in the Saone rivier in Lyon, a measured flow velocity profile was best represented with a small perturbation obtained by aplying $A_2 = 0.075$.
To date, no backscatter to sediment concentration conversion has been carried out on H-ADCP data because no reference measurements are available for H-ADCP stations. However, extensive transect SSC measurements have been performed on the Elbe rivier in fall 2006 (MAUSHAKE 2008). Abb. 2 shows the total sediment transport through the ADCP measurement range at the Cuxhaven transect in the Elbe.

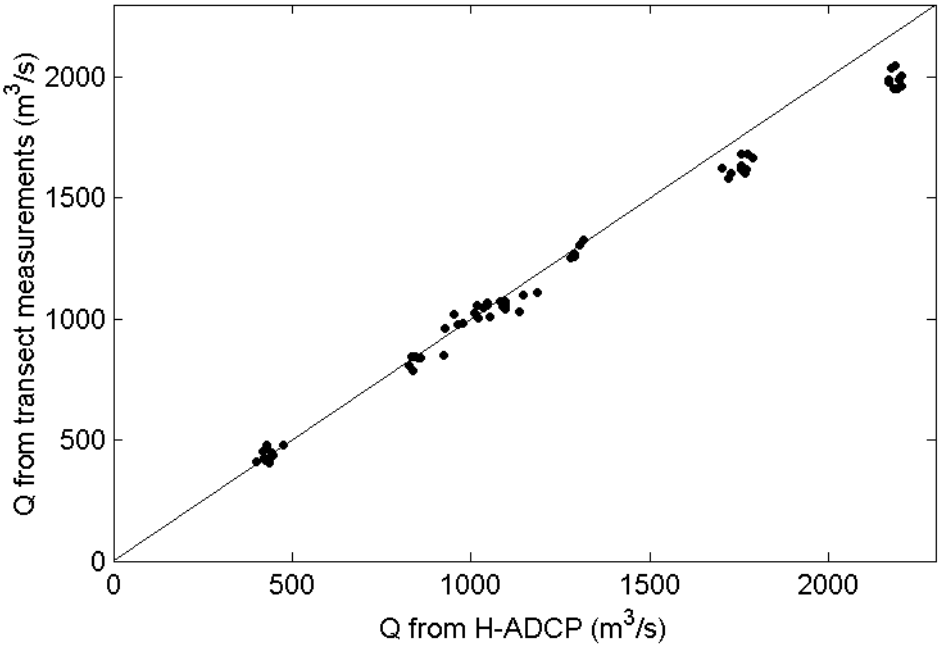


Abb. 1: Relationship between the discharge measured by a H-ADCP and the discharge estimated from transect measurements at the Tricastin station, France.

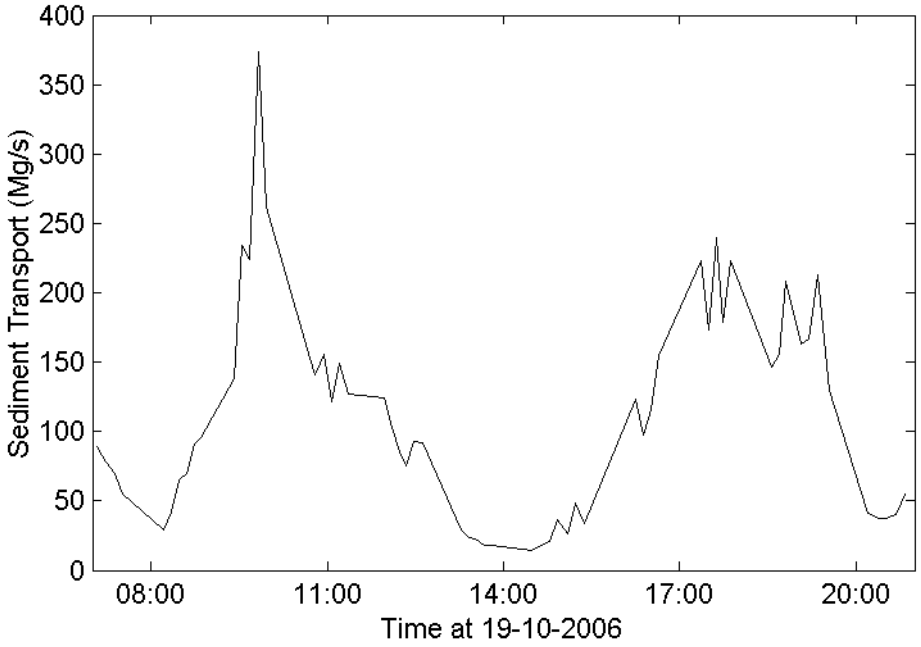


Abb. 2: Total cross sectional sediment transport measured with ADCP transects in the Elbe at Cuxhaven. The period before 14:00 is the flood phase and after 14:00 is the ebb phase.

It shows that the maximum transport during flood is higher than during ebb. To simulate H-ADCP measurements, the sediment transport measured at a certain height above the bed is plotted in Abb. 3. It shows that during ebb, the sediment transport higher in the water column is relatively larger compared to the flood transport than for the total sediment transport. Apparently, the sediment is distributed higher in the water column during ebb than during flood. This might be caused by the entrance of several shallow tidal channels from a wadden area north of the Cuxhaven transect.
This results in that the total sediment transport is best represented by the transport at a level of 11 meter below reference level (Abb. 4). The correlation at this level is also equal for both flood and ebb resulting in an indexing function that is valid for both tidal phases.

4 Discussion

The results from the Elbe measurements show that for the measured tidal cycle, a good relationship could be found between the sediment discharge at a certain height and the total discharge. However, several issues need to be resolved for a fully functional sediment discharge monitoring system.
First of all, total discharge measurements like the Elbe measurements showed in the measurement results section, will have to be repeated for different stages of the tidal neap-spring cycle as well as for different river discharges.

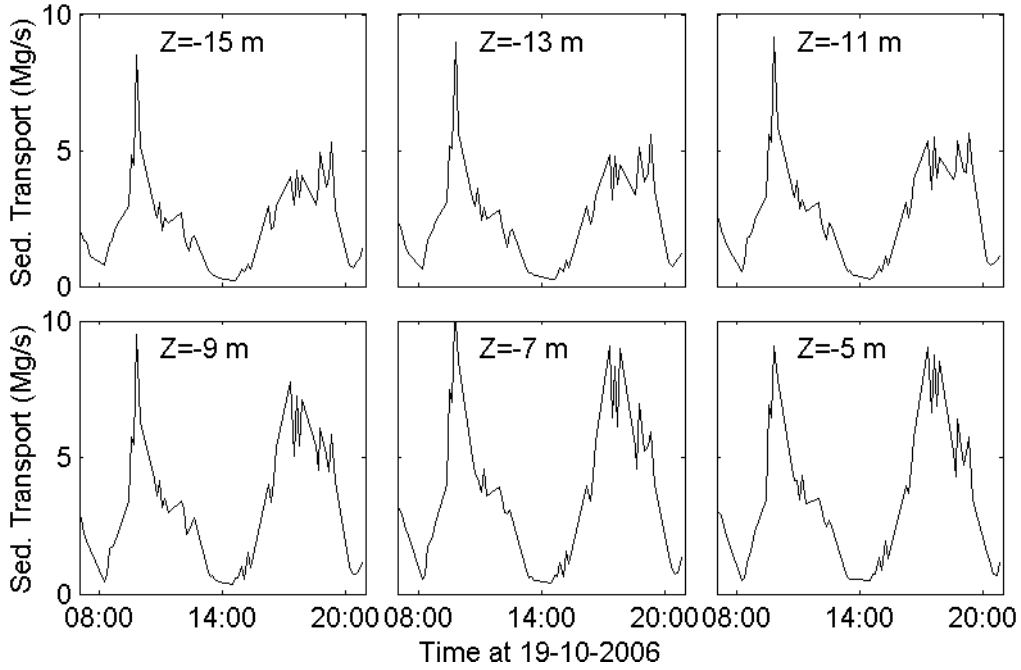


Abb. 3: Sediment transport at six heights relative to a reference level in the Elbe at Cuxhaven. The period before 14:00 is the flood phase and after 14:00 is the ebb phase.

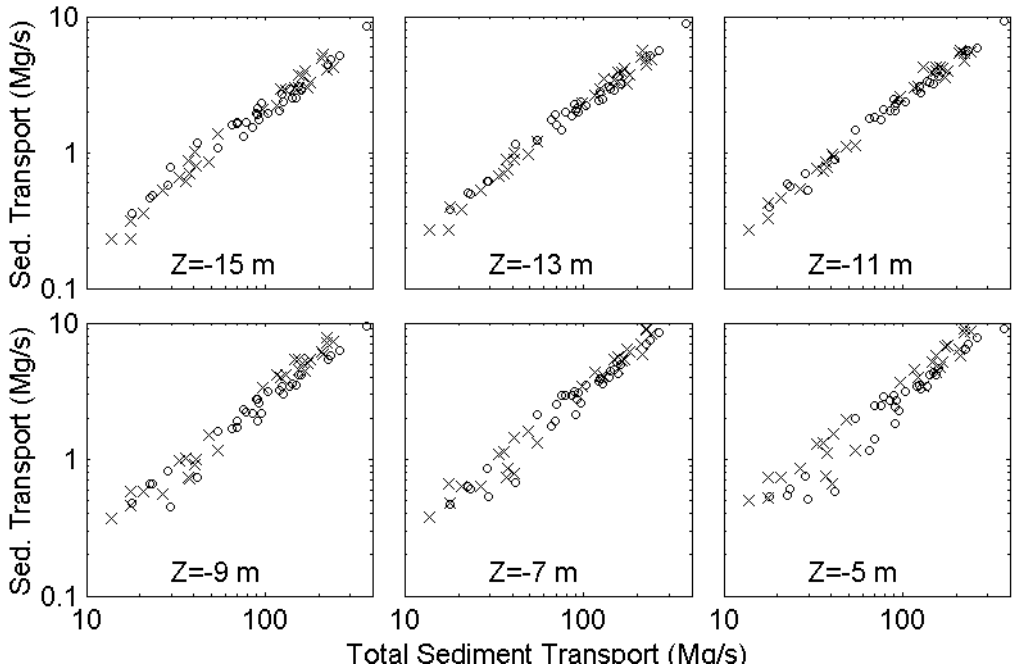


Abb. 4: Relation between the total sediment transport and the sediment transport at six fixed levels relative to a reference level in the Elbe at Cuxhaven. Circles stand for flooding tide and crosses for ebbing tide.

A second issue is that suspended sediment in nature consists of two parts: wash load and suspended local bed material. Wash load generally consists of fine sediment (silt and clay) which is always kept in suspension. Wash load sediment is generally not locally picked up from the bed but transported from upstream. The amount of wash load may therefore not be correlated with local stream power, but is often correlated with the amount of sediment delivered to the river from upstream catchments during rain storms. In the upper parts of the water column, suspended sediment is generally dominated by wash load. This means that the sediment in suspension measured by a H-ADCP mostly consists of wash load.

The diffusion equation (equation 9) is only applicable to the suspension of local bed material, which depends only on the strength of the flow and the sediment grain size. Therefore, the diffusion equation may not be applicable for the vertical extrapolation of the measured sediment discharge. On the other hand, wash load sediment is generally quite homogenously distributed through the water column, especially in purely fluvial environments at sifficient downstream distance from confluence points. This has been shown in many turbidity monitoring programs where the turbidity was monitored at one point in a stream cross section and used as a representative measure for the complete cross section (e.g. WASS 1999). However, WASS (1999) also showed that wash load sediment is not equally distributed across a stream. Therefore, a H-ADCP may be advantageous over a turbidity sensor for wash load sediment discharge montoring.

A third issue is the often positive correlation between suspended sediment concentration and suspended sediment grain size which disturbes the relation between acoustic backscatter and sediment concentration, because acoustic backscatter and sediment grain size are also related (equation 7). Therefore, the relation between suspended sediment grain size and suspended sediment concentration should also be established at different discharge stages.

Considering the above mentioned issues, an H-ADCP seems well suited for wash load monitoring. However, if not only wash load is to be monitored but also, or only, suspended transport of local bed material, the H-ADCP should be mounted as close to the bed as possible. When the H-ADCP is located close to the bed, use can be made of the fact that acoustic sensors are most sensitive to coarse material. If in a stream a clear distinction exists between the grain sizes of the wash load material and the bed material, a close to the bed located ADCP will mostly sense the bed-material. In that case, the diffusion equation may also be applied to the backscatter measurements to create a vertical sediment discharge profile. Additionally, for the monitoring of suspended transport of local bed material, information on cross stream variation in suspended sediment concentration is crucial because of the often strong lateral variability of bed sediment properties.

5 Conclusions

This paper evaluated the potential of a horizontally scanning Acoustic Current Doppler Profiler (H-ADCP) for the use of sediment dicharge monitoring. We conclude that the H-ADCP is a very well suited instrument for the monitoring of wash load material. Additionally, the H-ADCP has several advantages over more traditional wash load monitoring methods like turbidity sensors, namely:

- information on lateral variation in sediment discharge,
- flow velocity and sediment concentration measured by a single intrument,
- less influence of bio-fouling and other sensor detoriation effects,
- due to distant sensing capability of H-ADCP, the opportunity exists of more robust mounting of H-ADCP resulting in more confidence on correct measurement of high discharge events.

For the monitoring of suspended local bed material, more research is needed for the vertical extrapolation of the measured sediment concentrations.

6 Literatur

COLES, D.: The law of the wake in the turbulent boundary layer, Journal of Fluid Mechanics 1, 1956

HOITINK, A.J.F, P. HOEKSTRA: Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment. Coastal Engineering 52, 2004

LE COZ, J., G. PIERREFEU, M. JODEAU, A. PAQUIER: Mean vertical velocity profiles from ADCP river discharge measurement datasets. 32nd congress of IAHR, Venice, 2007

MAUSHAKE, C.:Untersuchungen zur Schwebstoffdynamik im Elbeästuar auf Basis von ADCP - Messungen, Küste, 2008

WASS, P.D., G.J.L. LEEKS: Suspended sediment fluxes in the Humber catchment, UK. Hydrological Processes 13, 1999

Kontakt:
Pim van Santen
Aqua Vision BV
Servaasbolwerk 11, 3512 NK Utrecht
The Netherlands
Tel.:+31-30-2459872
Fax:+31-30-2459499
E-Mail:p.vansanten@aquavision.nl

1993 – 2000
Study Physical Geography, Utrecht University

2000 – 2002
Junior Researcher, Physical Geography, Utrecht University

2002 – 2006
PhD candidate, Physical Geography, Utrecht University

seit 2007
Research employee, Aqua Vision BV.

Projektbearbeitung:
2002 – 2006: Sediment transport study at an intertidal outer delta sandbank.
seit 2007: SSC measurements using an ADCP

Untersuchungen zur Verdriftung von Baggergut mit ADCP auf einer Klappstelle vor Rügen

Christian Maushake

1 Einleitung

Im Juni/Juli 2007 sind Unterhaltungsbaggerungen in der Ostansteuerung nach Stralsund durchgeführt worden. Das hierbei anfallende Baggergut wurde auf Klappstellen im Revier aquatisch umgelagert.
Zur Beurteilung der Auswirkungen der Verklappvorgänge auf die Wasserbeschaffenheit ist seitens des WSA Stralsund ein Klappstellenmonitoring durchgeführt worden.
Ergänzend zu diesen umfangreichen Untersuchungen des WSA Stralsund wurde durch die Diensstelle Hamburg (DH) der BAW die Erprobung eines schiffsgestützten Verfahrens zur Erfassung von suspendierten Feststoffen in der Wassersäule durchgeführt. Untersuchungsziel der BAW war es, die Verklappung und das Absinken des Baggergutes durch die Wassersäule, sowie die Ausbildung der hierdurch entstehenden Trübungswolke und deren Ausbreitung infolge der hydrodynamischen Randbedingungen (Strömung, Seegang, Dichte- und Temperaturschichtung) zu erfassen und beschreiben zu können. Die Messungen der BAW-DH fanden am 18. Juli 2007 auf der Klappstelle KS 527 „Thiessower Steintrendel“ statt (siehe Abb.1).

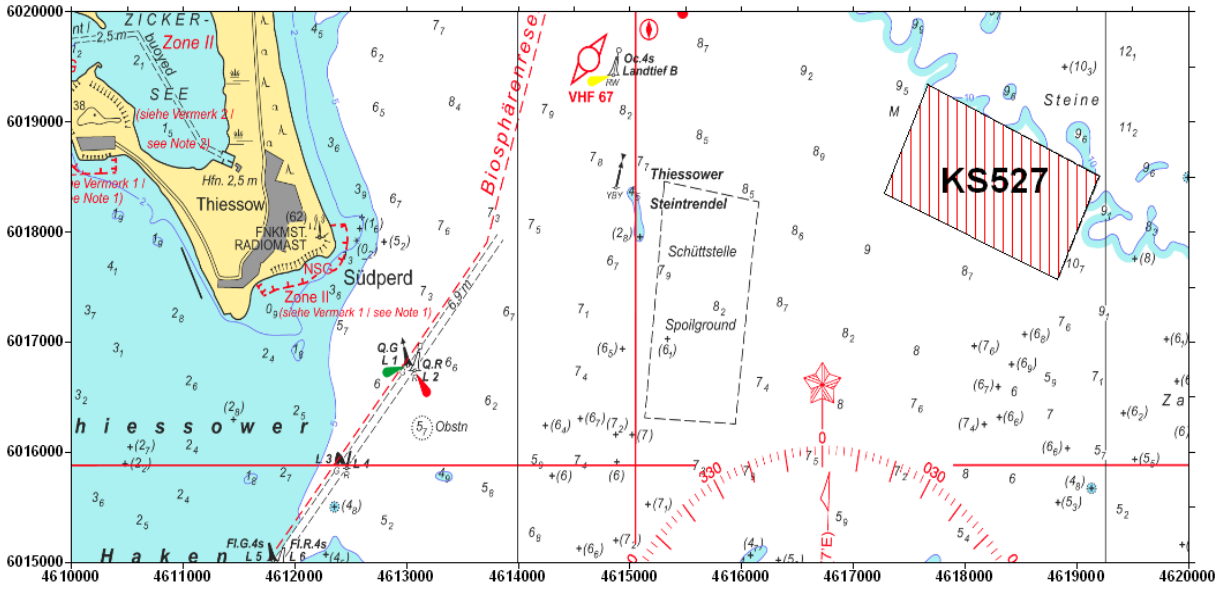


Abb. 1: Übersicht über das Untersuchungsgebiet, Klappstelle KS527 „Thiessower Steintrendel“. Ca. 6 km östlich der Lokation „Südpferd“ an der Südostspitze von Rügen

2 Eingesetztes Verfahren

Das von der BAW-DH für die prozessorientierte Beschreibung des Verklappungs-Vorganges eingesetzte Verfahren basiert im Kern auf der Durchführung schiffsgestützter Messungen mit einem Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) in Kombination mit zusätzlicher Sensorik und Probenahmeverfahren und wird von der BAW-DH seit ca. 2 Jahren für die Durchführung von Schwebstoffmessungen eingesetzt. Für die Datenaufnahme und –analyse kommt das von der niederländischen Firma AquaVision BV entwickelte Softwaresystem VISEA / PDT in einer für die BAW angepassten Version zum Einsatz. Auf eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens wird im Rahmen dieses Manuskriptes verzichtet, es sei verwiesen u. a. auf (MAUSHAKE 2005; MAUSHAKE & AARDOOM 2007). Die Anwendung dieser Methode auf den hier beschriebenen Einsatzfall einer Baggergut-Verklappung in einem Ostsee-Revier stellt eine Pilotanwendung im Sinne einer Geräte- bzw. Systemerprobung dar.
Die Verwendung eines schiffsgestützten Verfahrens ermöglicht es, die durch die Verklappung eingetragene Trübungswolke in der Wassersäule zu identifizieren und dann dynamisch, ortsunabhängig zu verfolgen („Baggerwolkenverfolgung“). Hierdurch kann der Prozess der Verklappung hinsichtlich seiner räumlichen Ausdehnung und der dabei auftretenden Schwebstoffkonzentrationen in der Wassersäule beschrieben werden.
Der Prozess der Ablagerung des Materials auf der Gewässersohle ist bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht betrachtet worden.

3 Durchführung der Messungen

Die messtechnische Begleitung der Verklappung wurde am 18. Juli 2007 durchgeführt. Es konnten 2 Verklappungsvorgänge der selbst fahrenden Spaltklappschuten HH204 bzw. HH205 (siehe Abb. 2) der Heinrich Hirdes GmbH, Hamburg erfasst werden. Das Baggermaterial stammte aus Unterhaltungsbaggerungen in der „Palmer Ort Rinne“.
Das Messkonzept sah vor, in Abstimmung mit der Klappschutenbesatzung die Verklappung etwa im Zentrum der ausgewiesenen Klappstelle KS527 durchzuführen. Die Klappschute verlässt das Gebiet dann umgehend und das in unmittelbarer Nähe bereitstehende Messfahrzeug beginnt, Profilfahrten „in Luv“ der entstehenden Trübungswolke durchzuführen – diese also möglichst in einem rechten Winkel zur Strömungsrichtung zu verfolgen („Zick-Zack-Kurs“ oder Schleifenfahrt).

Abb. 2: großes Bild: Spaltklappschute HH205 auf Revierfahrt
kleines Bild: Spaltklappschute HH204 schließt nach Verklappung

3.1 Nullmessung

Vor den Verklappungen ist im Untersuchungsgebiet je eine Nullmessung im Randbereich der ausgewiesenen Klappstelle durchgeführt worden, um die jeweilige Hintergrundtrübung in der Ostsee zu erfassen (siehe Abb. 3). Außerdem sollten hierdurch Strömungsrichtung und –geschwindigkeit festgestellt werden, um die Richtung der nach der Verklappung durchzuführenden Profilfahrten festzulegen.
Zur Kalibrierung der ADCP-Signale sind während der Nullmessungen auf stationären Vertikalprofilen Wasserproben in unterschiedlichen Tiefenschichten durch Abpumpen (Pumpproben) entnommen und CTD-Messungen zur Erfassung von Salzgehalts- und Temperaturprofilen durchgeführt worden. Hieraus wurde in der späteren Auswertung die Hintergrundtrübung abgeleitet.

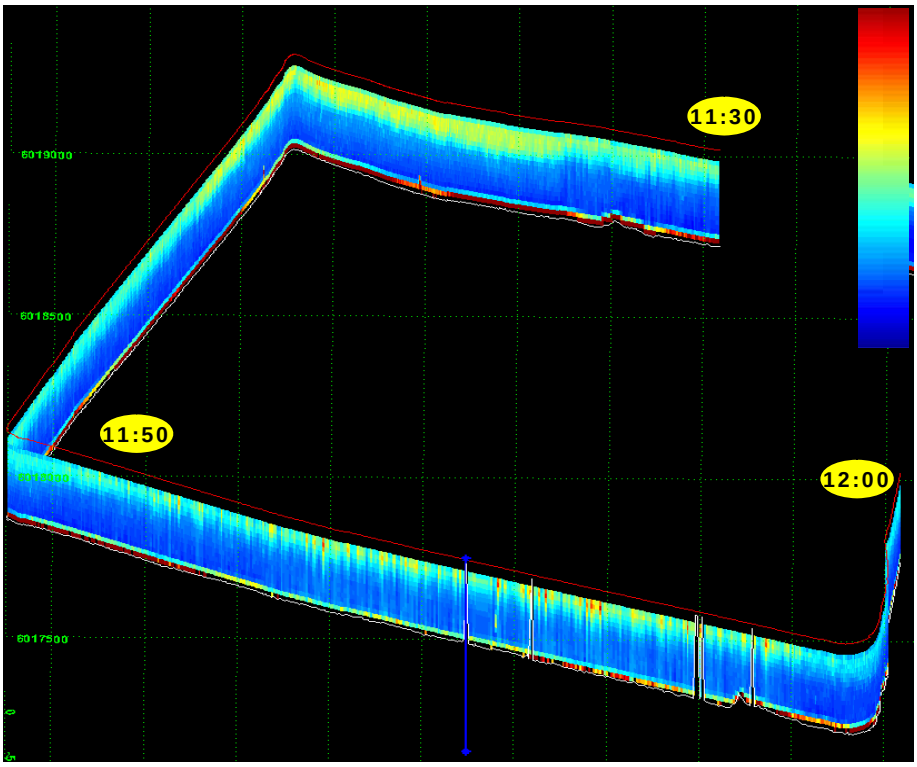


Abb. 3: 3D-Darstellung der Nullmessung V1 aus Bildschirmabzug der Echtzeit - Datenerfassung mit VISEA / PDT, Farbverlauf nicht kalibriert: rot = „mehr“ Schwebstoff, blau = „weniger“ Schwebstoff

3.2 Verklappung

Die Durchführung der Nullmessung wurde so abgestimmt, dass unmittelbar nach deren Beendigung in Absprache mit der Klappschutenbesatzung die Verklappung durchgeführt wurde. Hierzu hielt sich das Messfahrzeug in unmittelbarer Nähe des mit einer Blase markierten Klapp-Punktes auf und fuhr unmittelbar nach Beendigung der Verklappung direkt in die Trübungswolke, um mit den Messungen zu beginnen. Der Verklappvorgang selbst dauert nur wenige Sekunden.
Nach Einfahren in die Trübungswolke wird zunächst eine Kalibriermessung durchgeführt, das heißt: Entnahme von 3-4 Pumpproben und Erfassung eines vertikalen CTD-Profils. Dann wird in einer Schleifenfahrt mit der zuvor festgelegten Profilrichtung (siehe Nullmessung) die Trübungswolke verfolgt.

Schon in der Echtzeitdarstellung lassen sich mit der (nicht kalibrierten!) Darstellung des absoluten Backscattersignals im Messquerschnitt die Bereiche erhöhter Trübung eindeutig identifizieren, so dass eine flexible, der jeweiligen Messsituation angepasste Optimierung der Messprofile möglich ist. Abb. 4 zeigt anhand eines Bildschirmabzuges der Echtzeit-Datenaufzeichnung den Messablauf bei der Erfassung der zweiten Verklappung. Um ca. 16:00 öffnete die Schute und verklappte – offenbar in zwei „Stößen“ – das Baggermaterial (das sind die beiden tief roten Bereiche in Abb. 4 mit der Uhrzeitbezeichnung 16:00). Danach wird in Schleifenfahrt die Verfolgung der Trübungswolke aufgenommen, bis sie in der Wassersäule gegen die Hintergrundtrübung nicht mehr zu identifizieren ist (unterste Profillinie, Abb. 4, Uhrzeitbezeichnung 16:19). Nach Beendigung der Schleifenfahrt wird eine Querfahrt durch alle Profillinien zurück auf den Klapp-Punkt vorgenommen (Ende der Fahrt 16:28). Die Kreuzungspunkte mit den Schleifenfahrten ergeben ein Indiz dafür, wie lange die Trübungswolke sich in der Wassersäule gehalten hat. In dem hier dargestellten Fall ist bei Wieder - Erreichen des Klapp-Punktes ca. 28 Minuten nach der Verklappung keine gegenüber dem Hintergrundsignal erhöhte Trübung mehr feststellbar.

Diese Darstellung und Interpretation ist in ihrer qualitativen Aussage („viel“ <> „wenig“) schon während der Messung möglich. Die spätere Auswertung und Kalibrierung ermöglicht darüber hinaus Aussagen über die absoluten Schwebstoffkonzentrationen (mg/l).

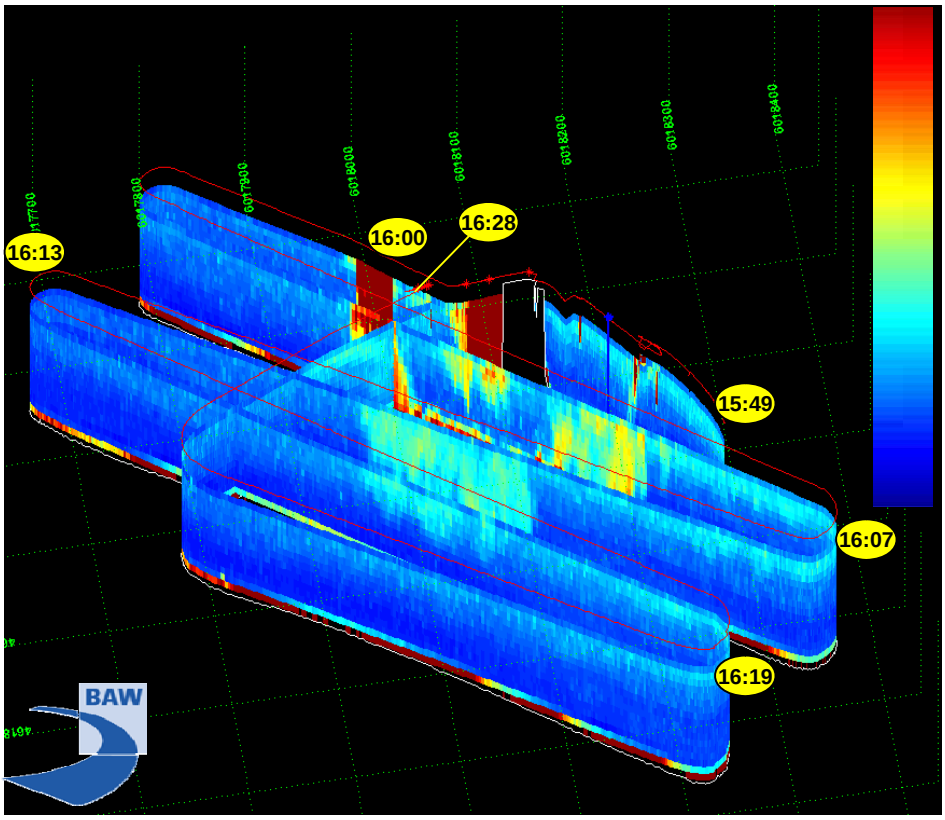


Abb. 4: 3D-Darstellung der Verklappung 2 (V2) aus Bildschirmabzug der Echtzeit - Datenerfassung mit VISEA / PDT, Farbverlauf nicht kalibriert:
rot = „mehr“ Schwebstoff, blau = „weniger“ Schwebstoff

4 Ergebnisse

Im Rahmen dieses Manuskriptes werden Analysen der Messungen der BAW vom 18.07.2007 präsentiert. Dies beinhaltet die kalibrierte Darstellung der Trübungswolken, georeferenzierte Darstellungen zu deren räumlicher und zeitlicher Ausdehnung sowie eine Interpretation der Ergebnisse.

Da es unter in-situ-Bedingungen praktisch nicht möglich ist, alle charakteristischen Kenngrößen so zu erfassen, dass eine direkte Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen (SSC in [mg/l]) aus Messrohdaten (akustischer backscatter in [counts]) möglich ist, wird für die endgültige Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen eine Kalibrierfunktion auf der Basis von Schwebstoffproben aus der Wassersäule angewendet. Die Qualität des Endergebnisses hängt in hohem Maße von der Güte dieser Kalibrierung ab. Insofern ist es für die Durchführung der Messungen unbedingt erforderlich, ausreichend Kalibrierproben zu entnehmen

Die im Rahmen der Klappstellenuntersuchungen insgesamt 22 entnommenen Pumpproben waren für eine stabile Kalibrierung ausreichend. 7 der 22 Pumpproben wurden unmittelbar nach der Verklappung, teilweise noch in der Trübungswolke entnommen. Bei diesen Proben traten auch die höchsten gemessenen Konzentrationen von 126.5 bzw. 316.6 mg/l auf. Mit der auf Basis dieser Pumpproben ermittelten Kalibrierfunktion sind die ADCP-Messdaten in absolute Schwebstoffkonzentrationen umgerechnet worden.

Die 3D-Ansicht der prozessierten ADCP-Daten in Abb. 5 und Abb. 6 stellt anschaulich die räumliche und zeitliche Ausdehnung der Trübungswolke dar, wobei Abb. 4 und Abb. 6. identisch sind, mit dem Unterschied, dass es sich in Abb. 6 um eine kalibrierte Darstellung handelt.

Die Verklappung V1 (Abb. 5) fand um 12:40 Uhr statt. Die eigentliche Verklappungswolke ist in dem Plot nicht gut zu sehen, weil sie durch das abschließende Stützprofil optisch verdeckt wird. Danach wurde die Profilfahrt zunächst „in die falsche Richtung“ – nämlich entgegen der vermuteten Driftrichtung – aufgenommen (Verständigungsfehler). Hierdurch zeigte sich jedoch, dass in dieser Richtung kaum nennenswerte Erhöhungen der Schwebstoffkonzentrationen auftraten (12:50 Uhr). Lediglich in dem nächsten – dann in Driftrichtung gefahrenen – Profil zeigt sich eine erhöhte Trübung (Profilende 13:00 Uhr). In der letzten Profillinie (13:18 Uhr) sind bodennah noch leicht erhöhte Trübungen festzustellen. In den Kreuzungspunkten des abschließenden Stützprofils (Ende: 13:24 Uhr) zeigt sich, dass die Trübung innerhalb der seit der Verklappung vergangenen ca. 40 Minuten überall wieder auf die Größenordnung der Hintergrundtrübung zurückgegangen ist.

Die Verklappung V2 wurde schon im Abschnitt 3.1 dem Grunde nach beschrieben. Die Verklappung selbst fand in zwei kurz aufeinander folgenden „Schüben“ statt – eventuell durch nachrutschendes Material in der Klappschute. Bei der Verklappung V2 ist sowohl die Verklappung selbst als auch die Trübungswolke deutlicher zu identifizieren (Vielleicht ist einfach mehr Material verklappt worden, hierzu liegen jedoch keine Informationen vor.). Die Schleifenfahrt ist analog zu Verklappung V1 durchgeführt worden und auch hier ist ca. 30 Minuten nach der Verklappung bei Wiedererreichen des Klapp-Punktes die Konzentration auf dem abschließenden Stützprofil wieder annähernd auf die Hintergrundtrübung zurück gegangen.

Bei beiden aufgezeichneten Verklappungen wurde in der Wassersäule nach rd. 30 – 40 Minuten keine gegenüber der Hinterrundtrübung erhöhte Schwebstoffkonzentration mehr gemessen.

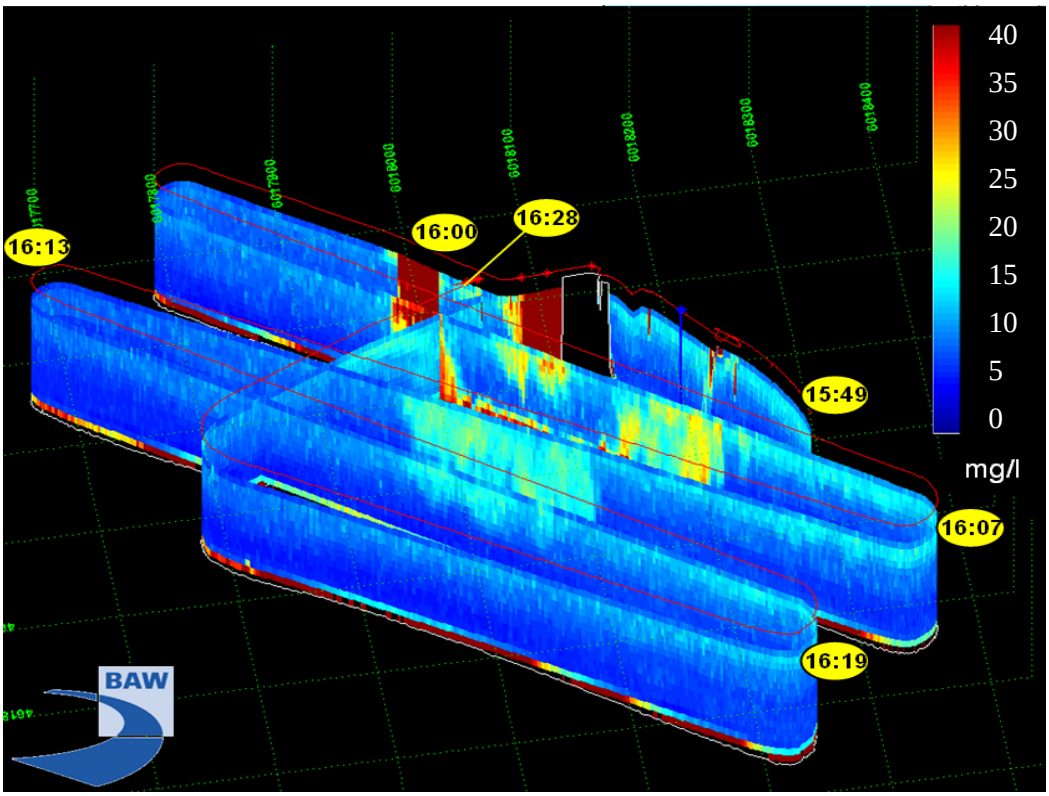


Abb. 5: 3D-Ansicht der Schleifenfahrt, Verklappung 1, 18.07.2007 12:40, kalibrierte Darstellung

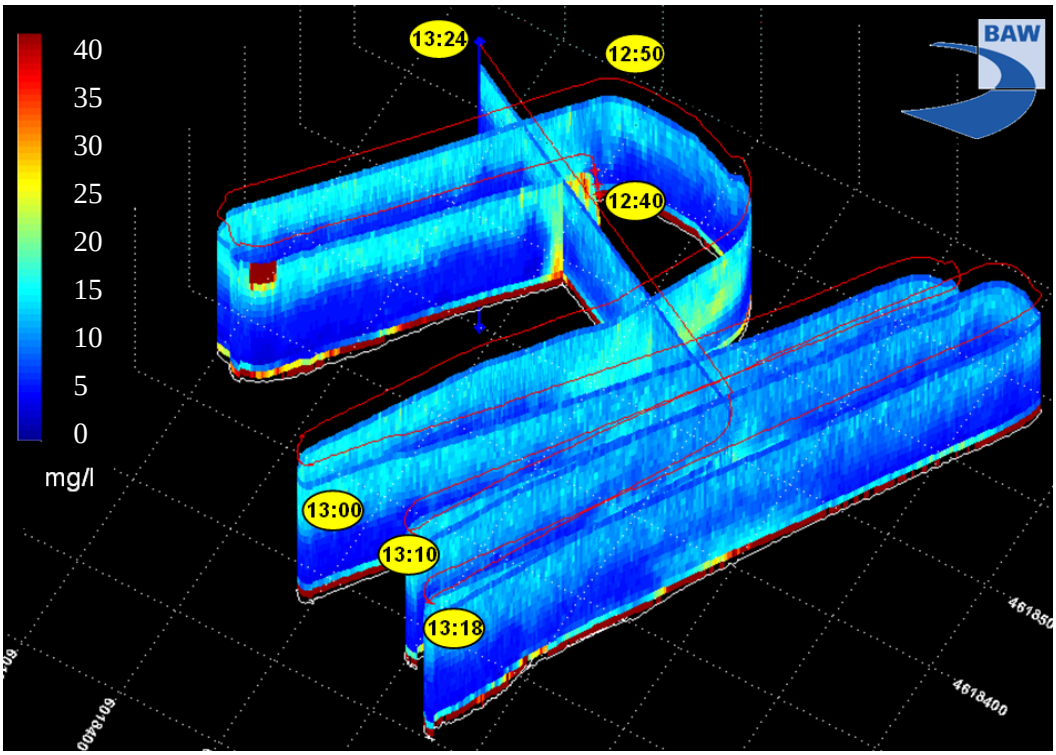


Abb. 6: 3D-Ansicht der Schleifenfahrt, Verklappung 1, 18.07.2007 16:00, kalibrierte Darstellung

Zur Beurteilung der räumlichen Ausdehnung der Trübungswolke sind die georeferenzierten Darstellungen in Abb. 7 und Abb. 8 gewählt worden. Hierzu ist zunächst die Hintergrundtrübung aus den Nullmessungen festgestellt worden, welche sich zu 15 mg/l (Nullmessung 1) und 13 mg/l (Nullmessung 2) ergeben haben. Diese Werte wurden jeweils als Schwellwert für die Bereiche erhöhter Trübung angesetzt.

Aus den Ergebnissen der Schleifenfahrten sind dann tiefengemittelte georeferenzierte Werte für die Schwebstoffkonzentration extrahiert und in 2 Stufen klassifiziert dargestellt worden: „Blau“ bedeutet hierbei, dass der tiefengemittelte Wert der Schwebstoffkonzentration kleiner als die mittlere Hintergrundtrübung ist, „rot“ alle Werte die größer sind. Hieraus lässt sich die räumliche Ausdehnung der Trübungswolke gut abschätzen. Der mittlere, zum Verklappungszeitpunkt herrschende Strömungsvektor ist ebenfalls eingetragen.

Im Fall der Verklappung V1 hat die Trübungswolke eine maximale Ausdehnung von ca. 500 m in Strömungsrichtung und von ca. 200 m quer dazu. Bei der Verklappung V2 lauten die Werte 300 m bzw. 400 m.

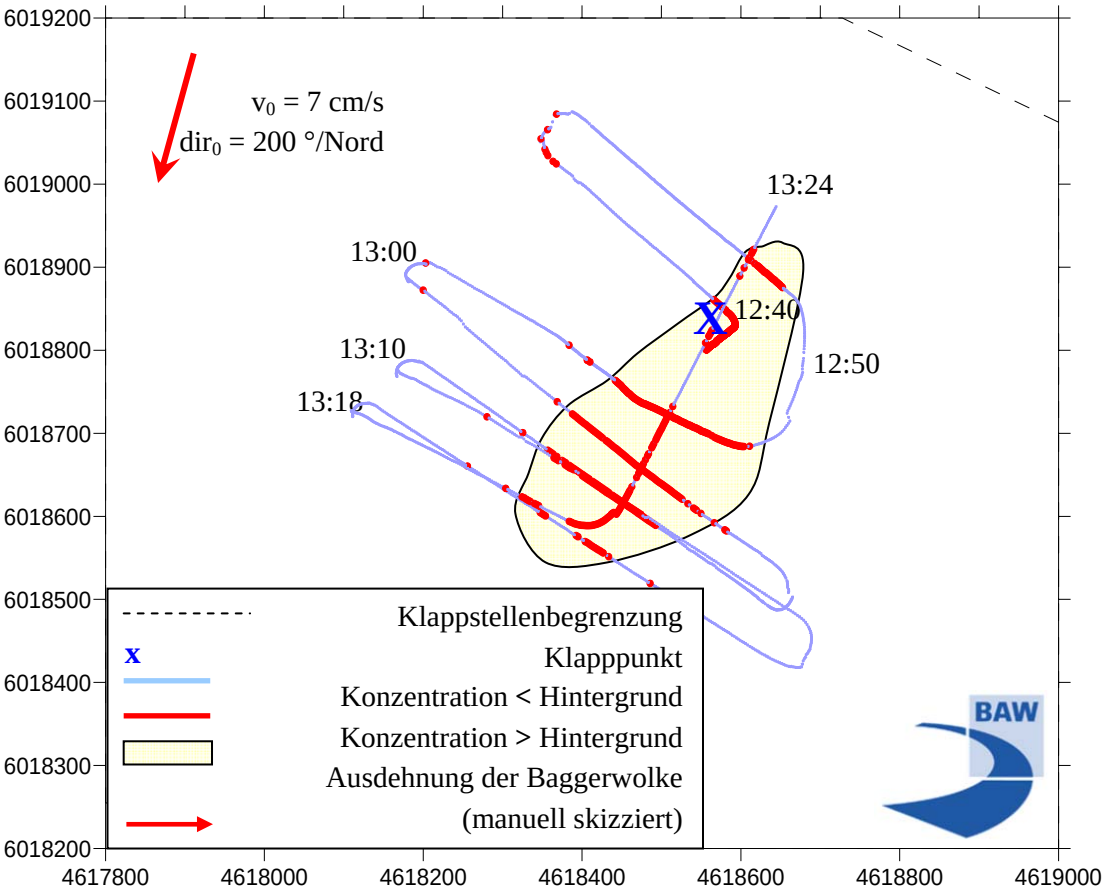


Abb. 7: Räumliche Ausdehnung der gegenüber der Hintergrundtrübung erhöhten Schwebstoffkonzentration nach der Verklappung 18.07.2007, 12:40. Der zeitliche Verlauf ist durch die Passagezeitpunkte angedeutet

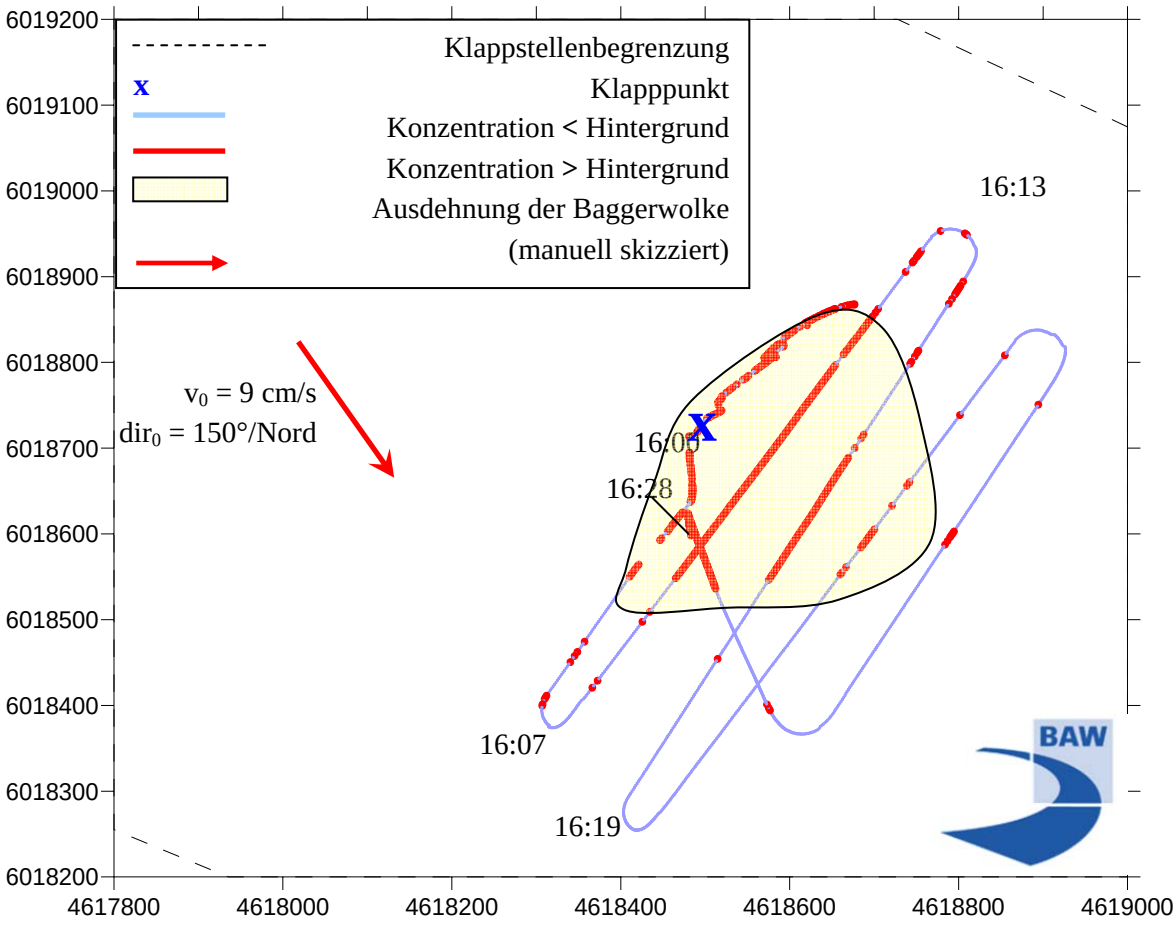


Abb. 8: Räumliche Ausdehnung der gegenüber der Hintergrundtrübung erhöhten Schwebstoffkonzentration nach der Verklappung 18.07.2007, 16:00. Der zeitliche Verlauf ist durch die Passagezeitpunkte angedeutet

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Messungen am 18. Juli 2007 auf der Klappstelle KS 527 lassen sich nach den hier präsentierten Auswertungen wie folgt zusammenfassen:

> Das verklappte Baggermaterial hat die ausgewiesene Klappstelle KS 527 bei beiden beobachteten Verklappungen nicht verlassen bzw. war gegen das unter ungestörten Bedingungen erfasste Hintergrundsignal nicht mehr nachweisbar. Die maximale räumliche Ausdehnung, in der die Trübungswolke gegen das Hintergrundsignal noch nachweisbar war, betrug 500m.

> Nach 30 bzw. 40 Minuten war nach erneuter Passage des Klapp-Punktes keine erhöhte Trübung in der Wassersäule mehr feststellbar, das verklappte Baggermaterial ist also zu Boden gesunken. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich alle in diesem Zusammenhang gemachten Aussagen nur auf den tatsächlichen Messbereich des ADCP beziehen. Systembedingt kann eine sohlparallele Schicht von ca. 6% der Wassertiefe nicht erfasst werden kann. Material, welches sich unterhalb dieses vom System nicht mehr erfassten sohlnahen Bereiches befindet, kann nicht ausgewertet werden.

> Die maximal auftretenden Schwebstoffkonzentrationen betrugen 126.5 bzw. 316.6 mg/l und sind direkt in der Baggerwolke festgestellt worden. Ansonsten lagen die Schwebstoffkonzentrationen ca. 6- bis 20-fach niedriger, die mittlere festgestellte Hintergrundtrübung im Untersuchungszeitraum betrug ca. 14 mg/l.

Hinsichtlich der räumlichen und zeitlichen Ausdehnung der Trübungswolke sind die hier präsentierten Ergebnisse als robust einzuschätzen. Die Trübungswolke konnte eindeutig gegen das erfasste Hintergrundsignal identifiziert werden.

Auch die Absolutbeträge der gemessenen Schwebstoffkonzentrationen sind in ihrer Größenordnung als korrekt einzuschätzen. Eine Besonderheit bei dem hier untersuchten Vorgang der Baggergutverklappung ist, dass das „natürliche“ Schwebstoffregime bei der Verklappung nur kurzfristig, dafür aber mit hoher Intensität verändert wird. Inwieweit dieser Umstand Auswirkung auf die Kalibrierung hat und ggf. Änderungen in der Messstrategie erforderlich macht, ist bisher noch nicht untersucht.

Im Zuge der hier vorgestellten Untersuchungen ist nicht geprüft worden, ob die gezeigten Ergebnisse repräsentativ für den untersuchten Prozess der „Baggergutverdriftung“ sind. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass:

> nur eine geringe Anzahl von Verklappungen (zwei) messtechnisch begleitet wurden

> die am Tage der Verklappungen vorherrschende hydrologische Situation (Strömung, Seegang) als „sehr ruhig“ einzuschätzen war. Eine Übertragung der Ergebnisse ist für andere hydrologische Situationen (z. B. stärkeren Strömungs- oder Seegangssituationen) nicht möglich.

> Die Prozesse der Verdriftung von Sohlmaterial sind bei diesen Untersuchungen außer Acht gelassen worden.

Die im Rahmen einer Systemerprobung eingesetzte Methode zur dynamischen Erfassung von Trübungswolken hat sich als sehr leistungsfähig herausgestellt und ist gut geeignet, das prozessorientierte Verständnis bei der aquatischen Umlagerung von Baggermaterial zu verbessern.

Literatur

MAUSHAKE, C.: Messung der ästuarinen Schwebstoffdynamik als Validierungsgrundlage für die HN-Modellierung; Vortrag auf dem BAW-Kolloquium „Fachliche Grundlagen zur Begutachtung wasserbaulicher Maßnahmen an Seeschifffahrtsstraßen“ am 10.11.2005; download unter www.baw.de

MAUSHAKE, C. & J. AARDOOM: Suspended Sediment Measurements on the River Elbe using ADCP; Underwater Acoustic Measurements 2007

Kontakt:
Dipl.-Ing. Christian Maushake
Bundesanstalt für Wasserbau,
Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg
Tel.: 040/ 81908 342
christian.maushake@baw.de

Jahrgang: 1960

1981 – 1989
Studium Vermessungswesen FH Oldenburg, anschließend
Studium Hydrographie, FH Hamburg

seit 1989
Angestellter der Bundesanstalt für Wasserbau

Arbeitsschwerpunkte:

- Planung, Durchführung und Koordinierung von umfangreichen Naturuntersuchungen in Küstengewässern und Ästuaren, z. B.:
    - Hydrodynamik, Morphologie und Feststofftransport
    - Seegangsuntersuchungen
    - Dynamisches Verhalten großer Containerschiffe
- Konzeptionierung und Implementierung hydrographischer Messsysteme, z. B.:
    - ADCP
    - Seabedclassification
    - CTD und Probenahmesystme
    - Präzise GPS-Ortung
    - Verankerungs- und Datenübertragungssysteme
- Erhebung von Validierungsdatensätzen für die HN-Modellierung

Detaillierte Einblicke in die ästuarine Schwebstoffdynamik mittels hochauflösender Hydroakustik

Kerstin Schrottke und Alexander Bartholomä

1 Einleitung

Der Bedarf, tidedominierte Flussmündungen weltweit als Zufahrtswege für Häfen und als Wasserstraßen intensiv zu nutzen, wächst stetig. Wasserbauliche Eingriffe zur nutzungsorientierten Anpassung der Flussgeometrie, darunter Ausbaggerungen, rufen unweigerlich Veränderung der Hydro-, Morpho- und Sedimentdynamik hervor. Detaillierte Kenntnisse über die komplexen ästuarinen Prozessabläufe, insbesondere in den Trübungszonen, in denen Süß- und Salzwasser aufeinander treffen, interagieren und mitgeführte Schwebstoffe durch Absatz mächtige Schlickablagerungen bilden, sind von elementarer Bedeutung. Derartige Sedimentakkumulationen können in Abhängigkeit ihrer physikalischen und rheologischen Eigenschaften die nautische Sohle maßgeblich verringern. Kommt es ferner durch schnelles Absinken großer Schwebstoffflocken zur Bildung mächtiger hochviskoser, flüssiger Schlicke („fluid mud“), so sind diese mit herkömmlichen Echoloten oft nicht von der festen Sohloberfläche zu unterscheiden. Zur Sicherstellung der garantierten Solltiefe sind damit Unterhaltungsbaggerungen unumgänglich. Andererseits ziehen hohe Schwebstoffaufkommen oft verringerte Sauerstoffgehalte nach sich, was schließlich zu einer Herabsetzung der Gewässergüte führt. Ein treffendes Beispiel für derartige Verhältnisse ist das Ems-Ästuar. Wiederholte Ausbaumaßnahmen des Fahrwassers haben nicht nur eine Erhöhung des Tidenhubes erwirkt. Eine Zunahme der Schwebstoffkonzentration (SSC) innerhalb der letzten 30 Jahre um das 10fache sowie das derzeitig extrem hohe Schwebstoffaufkommen deuten auf signifikante, anthropogen verursachte Veränderungen der Sedimentdynamik hin (DE JONGE et al. 2007).

Die detaillierte Erfassung der Schwebstoffdynamik in Tide-Ästuaren setzt den Einsatz von Messtechniken voraus, mittels derer die prozesssteuernden Parameter in der Wassersäule bis in den tieferen Gewässergrund hinein mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung registriert werden können. Dieser Ansatz ist in einem aktuellen Forschungsvorhaben des DFG-geförderten Forschungszentrums Ozeanränder Marum in Bremen gemeinsam mit dem Forschungsinstitut Senckenberg am Meer in Wilhelmshaven aufgegriffen und durch den zeitgleichen Einsatz hydroakustischer Messgeräte in den Ästuaren der Weser und Ems innerhalb der letzten Jahre umgesetzt worden. Hier gilt es vornehmlich den Ansatz kombinierter Messtechnik vorzustellen, mit dem detaillierte Einblicke in die ästuarine Schwebstoffdynamik möglich werden.

2 Untersuchungsgebiete und Datenbasis

Um überregional geltende Aussagen zur Schwebstoffdynamik in Tide-Ästuaren treffen zu können, werden Messungen in zwei unterschiedlichen Gebieten, dem Weser- und Ems-Ästuar, durchgeführt. Beide Flüsse münden in die Nordsee (Abb. 1). Sie unterliegen der dort vorherrschenden, semidiurnalen Tidezyklizität sowie gleichen klimatischen Bedingungen. Ferner zählen beide Ästuare zu denen, deren ursprüngliche Geometrie und natürliche Dynamik durch Küstenbaumaßnahmen maßgeblich verändert worden ist. Heute unterscheiden sie sich vor allem in den unterschiedlich hohen Schwebstoffkonzentrationen, sowie in der Präsenz und Mächtigkeit flüssiger Schlickablagerungen. Weitere Gebietsinformationen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

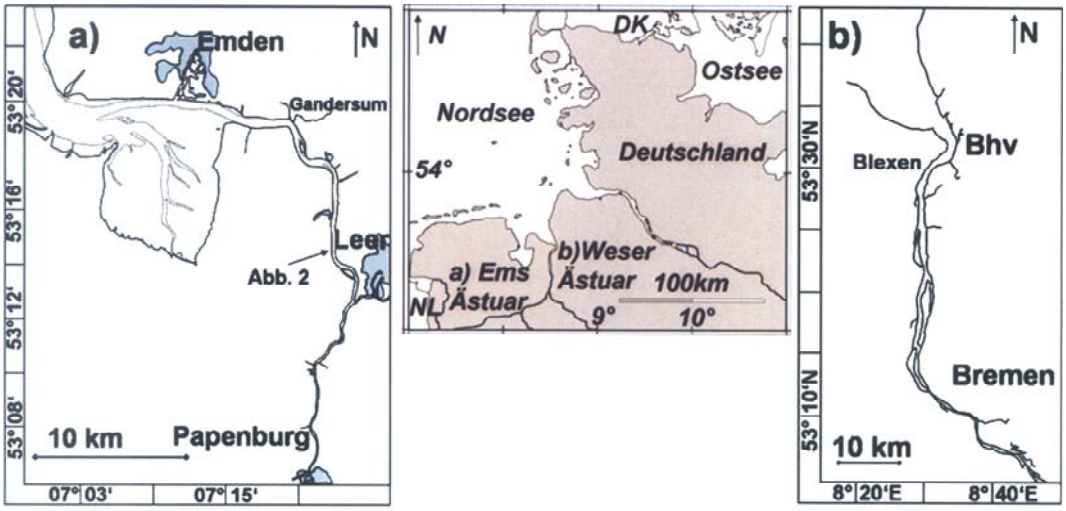


Abb. 1: Geografische Lage des Ems- (a) und des Weser-Ästuars (b)

Tabelle 1
Vergleichende Gegenüberstellung von Gebietsinformationen über das Weser- und Ems-Ästuar (*aus dem Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch 2006)

	Weser	Ems
Gesamtlänge	477 km	370 km
Länge des tidebeeinflussten Abschnittes	~ 120 km	~ 100 km
Tidedominanz	Ebbstrom dominiert	Flutstrom dominiert
Tidenhub	> 4 m	> 3,8 m
Länge und Lage der Trübungszone	15 - 20 km ~ Blexen	> 60 km ~ Gandersum
Oberwasserabfluss* bei mittel, min., max. [m³/s]	Intschede 237 / 124 / 1280	Versen 80,6 / 15,9 / 374
Nautische Tiefe	3,7 – 9 m	9 – 14 m

Die Datenerfassung erfolgt schiffsgestützt mit dem Forschungskutter *Senckenberg* in der jeweiligen Trübungszone der Untersuchungsgebiete. Seit 2002 sind 13 Messkampagnen im Weser-Ästuar und 3 Messkampagnen im Ems-Ästuar zu unterschiedlichen saisonalen und tidalen Bedingungen durchgeführt worden. Der Einsatz der Messgeräte erfolgt simultan auf Längsprofilen im Hauptfahrwasser sowie stationär. Proben werden stichpunktartig entnommen bzw. sind an akustische Auffälligkeiten geknüpft.

3 Methodik

Der Einsatz von Acoustic Doppler Current Profilern (ADCP) erfolgt mittlerweile nicht nur zur Messung von Strömungen und Wellen, sondern auch zur Abschätzung von Schwebstoffkonzentrationen durch Auswertung des akustischen Rückstreusignals (DEINES 1999). Abhängig von gerätespezifischer Sendefrequenz, Schwebstoffkonzentration und -charakteristik (Partikelzusammensetzung und -größe), lassen sich unter Verwendung von Konzentrationsangaben u. a. aus Wasserproben signifikante Korrelationen erstellen. Im Flachwasser kann zur Erfassung vor allem räumlich kleinskaliger Strömungsmuster auf hochfrequente (≥ 1200 kHz) Systeme mit hoher Auflösung (cm - dm) zurückgegriffen werden, da hohe Reichweiten keine Rolle spielen. In ästuarinen Trübungszonen mit hohen Schwebstoffgehalten steigt die sedimentbedingte Signaldämpfung jedoch oft erheblich an, wodurch aufwendige Anpassungen des Dämpfungskoeffizenten insbesondere hochfrequenter ADCPs nötig sind. Eine akustische Durchdringung durch sohlnahe, hochkonzentrierte Suspensionen bzw. flüssigen Schlick erfolgt meist nicht, so dass häufig der Übergangsbereich zwischen Wassersäule und fester Sohle beim Einsatz hochfrequenter ADCPs messtechnisch unerfasst bleibt. Die in dem Übergangsbereich stattfindenden Sedimentations- und Erosionsprozesse sind jedoch von elementarer Bedeutung für das Gesamtverständnis der Schwebstoffdynamik.

Diese Lücke lässt sich durch den Einsatz eines parametrischen Sedimentecholotes (SES) schließen, mit dem die Erfassung der Dynamik sohlnaher Suspensionen bzw. flüssiger Schlicke, aber auch des tieferen Gewässergrundes in hoher vertikaler Auflösung möglich wird (SCHROTTKE et al. 2005, 2006). Oft werden Vergleiche mit herkömmlichen meist Zweifrequenzecholoten angeführt, mit denen zwar zwei Sedimentoberflächen detektierbar sind, eine eindeutige Zuordnung der festen Sohle bei Präsenz mehrerer Sedimentlagen aber oft nicht unproblematisch ist (MÜLLER 1985). Mit dem SES können auch unterschiedlich hoch konzentrierte Suspensionen bzw. Schlicke durch Impedanzänderungen sichtbar gemacht werden. Unabhängig von der Anzahl unterschiedlicher Sedimentlagen wird die Oberfläche der festen Sohle sowie der tiefere Untergrund messtechnisch erfasst und lässt sich damit als geeignetes Referenzniveau nutzen.

Weiterführende Informationen zur Beschaffenheit der Sohloberfläche u. a. hinsichtlich Sedimenttypus und Besiedlung liefern Seebodenklassifizierungssysteme. Allen Systemen gemein ist die digitale Echoauswertung von herkömmlichen Ein- und Mehrstrahlecholoten. Bislang liegen nur wenige Erfahrungswerte über Einsätze von Seebodenklassifizierungssystemen in Gebieten mit Vorkommen flüssiger Schlicke vor.

Der Einsatz von Seitensichtsonar und Fächerecholot erweitert die Perspektive auf die dreidimensionale Ebene. Auch diese Geräte treten hier an ihre messtechnischen Grenzen, wenn die genaue Erfassung der festen Sohle durch Präsenz flüssiger Schlicke akustisch unscharf wird. Erst durch den simultanen Einsatz und die Kopplung der verschiedenen Messverfahren ergibt sich ein detailliertes Bild zur Schwebstoffdynamik.

Die genaue geografische Positionierung ist Grundvoraussetzung hierfür. Alle Geräte werden zeitlich und räumlich aufeinander abgestimmt, um einerseits eine genaue Datenvergleichbarkeit zu gewährleisten und Signalinterferenzen zu minimieren. Profilierende CTD-Messungen (Conductivity – Temperature – Depth) dienen u. a. der Laufzeitkorrektur.

3.1 ADCP

Die Messungen werden mit einem 1200 kHz DR-BB (direct-reading-broadband) ADCP von RDInstuments – Teledyne™ durchgeführt. Die Zellgröße ist auf 25 cm gesetzt, bei einer statistischen Unsicherheit der horizontalen Geschwindigkeit von 10 cm s^{-1}. Auflösung und Genauigkeit der Strömungsrichtungsdaten betragen 0,2° und ± 2°. Das Gerät ist steuerbordseitig an einer Halterung montiert (Einhängetiefe: 1,35 m).

3.2 Parametrisches Sedimentecholot

Sohlnahe Suspensionen und konsolidierte Sedimente werden mit dem parametrischen Sedimentecholot vom Typ SES2000® Standard der Firma Innomar GmbH erfasst. Über einen kleinen Schallwandler (22 x 22 cm) entsendet das Gerät zeitgleich zwei leicht von 100 kHz differierende Impulse mit hohem Schalldruck (elektrische Pulsenergie > 18 kW; akustische Signalstärke > 239 dB/µPa re 1m). Bei nichtlinearer Schallausbreitung und Signalinteraktionen in der Wassersäule entstehen Sekundärfrequenzen, die in den Untergrund eindringen (wählbar: 4 – 15 kHz). Bei schmaler Schallkeule (Öffnungswinkel ± 1,8°) werden praktisch keine Nebenkeuleneffekte generiert. Primär- und Sekundärfrequenzen haben den gleichen akustischen Abtastbereich. Die vertikale Auflösung beträgt ≥ 6 cm bei wassertiefe- und frequenzabhängigen Genauigkeiten von z. B. 100/10 kHz: 2/4 cm + 0,02 % der Wassertiefe (WUNDERLICH & MÜLLER 2003). Die Pulsrate kann bis auf 50 Hz gesetzt werden, bei Pulslängen von 0,066 – 0,8 ms, je nach gewähltem Messbereich. Zur Erfassung flüssiger Schlicke hat sich die Sekundärfrequenz von 12 kHz als geeignet erwiesen. Damit sind im Rahmen dieser Studien Eindringungen bis zu 5 m in den konsolidierten Untergrund erzielt worden. Der Schallwandler wird backbordseitig an einer Halterung montiert (Einhängetiefe: 1,6 bzw. 1,8 m). Ein Bewegungssensor Typ Seatex MRU-6 erfasst schiffsbedingte Auslenkungen.

3.3 Seebodenklassifizierungssystem

Zur akustischen Klassifizierung der Sohloberfläche wird ein 200 kHz Einstrahlecholot vom Typ Furuno FCV-1000™ verwendet. Das Gerät arbeitet bei 6 dB mit einem Öffnungswinkel von 7,4°, einer Pulslänge von 0,5 ms und einer Sendeleistung von 1000 W (BARTHOLOMÄ 2006). Die digitale Auswertung des Signalspektrums des ersten direkten Rücklaufsignals erfolgt unter Verwendung des Seebodenklassifizierungssystem Typ QTC-View und QTC-Impact von Quester Tangent™. Spezielle Algorithmen dienen der Analyse von Echocharakteristik, -energie und -wellenform der Einzelsignale (COLLINS & GALLOWAY 1998). Es folgen Fourier- und Clusteranalyse, auf Grundlage derer schließlich Klassen generiert werden, die jeweils eindeutig akustische Gemeinsamkeiten aufweisen (BARTHOLOMÄ 2006).

3.4 Seitensichtsonar

Ein digitales Zweifrequenz (330 / 800 kHz) Seitensichtsonar Typ 881 Sportscan von Imagenex™ hat sich hier als geeignet erweisen (SCHROTTKE et al. 2006). Der nur 4,5 kg schwere (ohne Zusatzgewichte) und 83 cm lange Schleppfisch (Durchmesser: 11 cm) kann ohne Windeneinsatz problemlos betrieben werden und ermöglicht damit schnelle Schiffsmanöver. Benutzt wird die niedrige Frequenz (Öffnungswinkel: 1,8° bzw. 60°; Auflösung: 45 mm). Die Abtastbreite beträgt 30 bzw. 60 m pro Kanal bei Pulsraten von 11,2 Hz bzw. 7,8 Hz und Pulsinterwallen von 89 bzw. 128 ms. Die Pulslänge (≤ 25 ms) wird automatisch angepasst. Der Sonarfisch wird vom Heck des Schiffes mit ~3,5 Kn geschleppt.

3.5 Fächerecholot

Im Rahmen jüngster Messungen wird ein Fächerecholot Typ Seabat 8125 von Reson ^{TM} eingesetzt. Das System arbeitet mit 455 kHz zur Generierung des Sendesignals (Öffnungswinkel: 1° bzw. 130°). 240 Tiefenwerte werden simultan über eine Messdistanz von max. 120 m ermittelt. Die Empfängergeometrie ergibt eine Fächerbreite von 120° (0,5° bzw. 20°). Der Abtastbereich nimmt mit zunehmender Entfernung vom Nadir zu (ERNSTSEN et al. 2006). Bei Wassertiefen < 60 m ergibt sich eine Streifenbreite von 3,5 x der Wassertiefe, die bei Wassertiefen > 60 m abnimmt. Die vertikale Auflösung beträgt 6 mm. Die maximale Pulsrate beträgt 40 Hz. Schiffsbewegungen werden über einen Kreiselkompass mit Bewegungssensor Typ OCTANS^{TM} von Ixsea Oceano kompensiert. Der Schallwandler wird ebenfalls backbordseitig mittels Halterung in einer Einhängetiefe von 1,8 m betrieben.

3.6 Probennahme

Die Kalibrierung und Verifizierung akustischer Daten erfolgt über stichpunktartige Probennahmen. Ein horizontaler Wasserschöpfer der Firma HydroBios dient der punktuellen Entnahme von 2 L Probenvolumen. Dieser kann auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten, durch eine Finne zur Einregelung des Schöpfers in den Strom, eingesetzt werden. Eine weitgehend ungestörte Oberflächensedimentbeprobung erfolgt mit einem Shipekgreifer, mit dem bis zu 3000 ml Sediment (Grundfläche: 20 cm x 20 cm) gefördert werden können (MURDOCH & AZCUE 1995). Zur vertikal hoch aufgelösten Beprobung des Übergangsbereiches von flüssig zu fest wird ein Schwerelot vom Typ Rumohr eingesetzt (MEISCHNER & RUMOHR 1974). Bis zu 4 m lange (Durchmesser 8 cm) Plexiglasrohre werden in 10 cm Abständen jeweils mit 2 cm großen Löchern versehen und diese dann für den Einsatz mit Tape abgedichtet. Zur Beprobung werden die Löcher angeschnitten und das Probenmaterial je nach Konsistenz entweder per Schlauch oder Spritze entnommen (SCHROTTKE et al. 2006). Die Beprobungsabstände können frei um 10er Schritte vergrößert werden.

Die Bestimmung von SSC (Vakuumfiltration über 1,2 µ Glasfaserfilter), Sedimentzusammensetzung und Korngrößenverteilung (u. a. Veraschung der Organik, Sedigraph, Sedimentationsröhre) sowie rheologischen Parametern (Viskosimeter) erfolgt im Labor.

4 Ergebnisse

Im Vergleich der Daten zur Erfassung der Schwebstoffdynamik in den Trübungszonen des Weser- und Ems-Ästuars fallen zunächst die unterschiedlich hohen Schwebstoffkonzentrationen auf. Dabei übersteigen die SSC-Werte aus der Wassersäule der Ems im Mittel jene aus der Weser, selbst in Nähe der Wasseroberfläche oft bis zu einem Faktor 10, mit SSC bis zu 10g/l. Beiden Gebieten gemein ist die zeitweilige Präsenz unterschiedlich großer Schwebstoffwolken bzw. lokaler SSC-An- und Abreicherungen im Längsschnitt der Trübungszonen. In der Ems gelangen hoch konzentrierte Schwebstoffwolken aufgrund turbulenter Durchmischung domartig teils bis zur Wasseroberfläche und zeichnen sich dort als dunkle Wirbel ab, wie in Abb. 2a zu sehen ist. Dieser vertikal gerichtete Sedimenttransport ist auch in den Daten der SES- und ADCP-Messungen zu erkennen. Strömungsinduzierte Schubkräfte bewirken ein Aufschwingen der Schlickoberfläche (Abb. 2b-d).

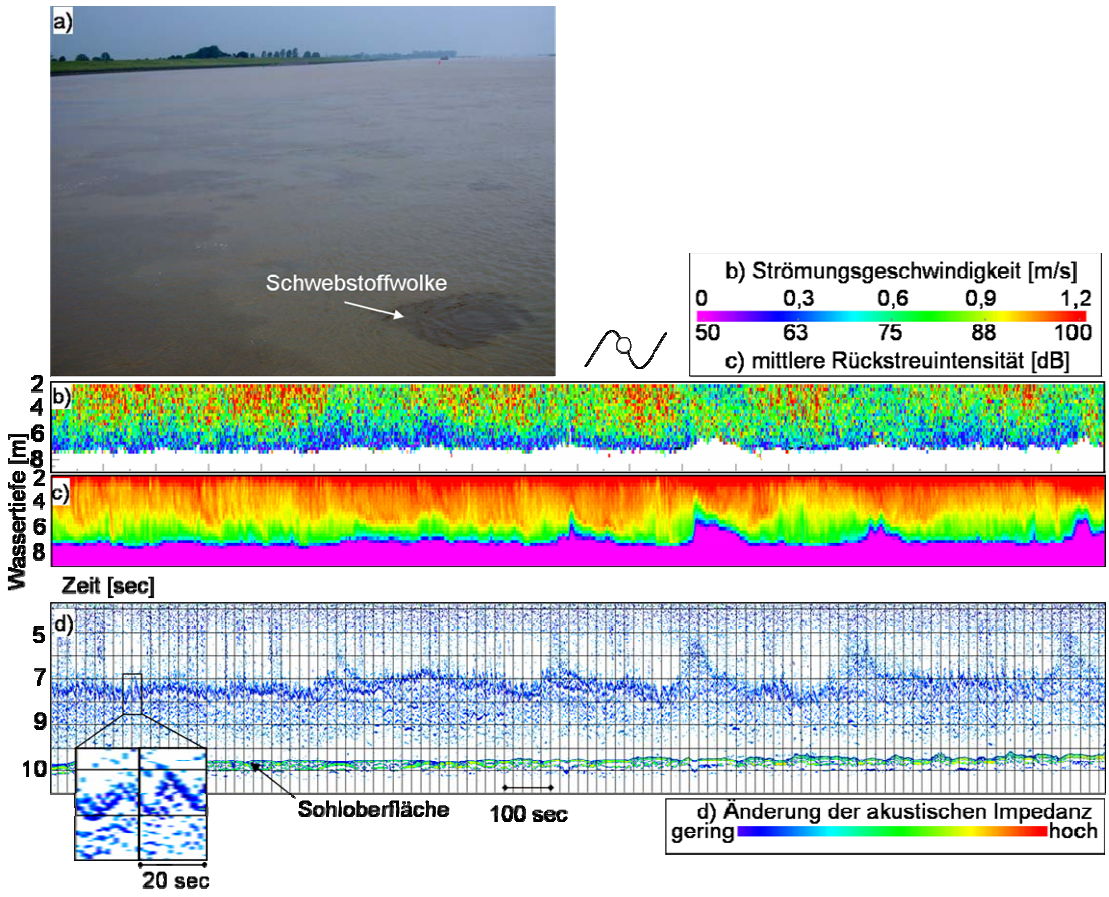


Abb. 2a-d: **a)** Bis zur Wasseroberfläche reichende Schwebstoffwolken in der Trübungszone des Ems-Ästuars 2 Stunden nach Hochwasser sowie **b)** stationäre ADCP-Messungen zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit und **c)** mittleren akustischen Rückstreuintensität und **d)** SES-Messungen zur Erfassung der Dynamik flüssiger Schlicke.

So ist die Schwebstoffverteilung keinesfalls homogen. Großräumige Verteilungsmuster sind dabei eng an die lokale Flussgeometrie, Zuflüsse, Bauwerke aber vor allem an die tideabhängige Schwebstoffhistorie (lokale Resuspension) sowie an die Oberwassersituation geknüpft.

Zu den jeweils kurzen Stauwasserphasen, die insbesondere in der Ems während Niedrigstauwasser nur wenige Minuten mit dem Aussetzen der Tideströmung verbunden sind, setzt ein massives Absinken von Schwebstoffflocken ein. Bei Flockendurchmessern bis zu 3 mm werden Sinkgeschwindigkeiten bis zu 1,5 cm pro Sekunde erreicht. Es folgt die Bildung bzw. Zunahme sohlnaher Suspensionen und flüssiger Schlicke mit SSC-Werten > 10 g/l bis 500 g/l. Dabei erreichen im Gebietsvergleich entsprechende Ablagerungen in der Ems Mächtigkeiten von bis zu 6 m bei gleichzeitig meist höherer Dichte und oft deutlicher Stratifizierung (Abb. 2d). In der Weser hingegen werden nur rund 15% der Wassersäule temporär von hoch konzentrierten Feinsedimenten eingenommen, die im Zuge der wiederkehrenden Tideströmung meist vollständig resuspendieren. In der Ems erfolgt in Abhängigkeit der Schichtdichten oft nur eine partielle Resuspension. Höher konzentrierte Lagen bleiben selbst bei Strömungsgeschwindigkeiten > 1,5 m s^{-1} erhalten.

In beiden Gebieten beginnt der Resuspensionsprozess oft mit der wellenförmigen Auslenkung der Grenzflächen bei wiederkehrendem Tidestrom (Abb. 2c-d). Im Gegensatz zur Weser, wo diese meist nur geringe Amplituden im Dezimeterbereich aufweisen und nicht lange stabil bleiben, sind Wellenformationen mit Amplituden von mehreren Metern in der Ems keine Seltenheit (Abb. 2d). Das Auftreten größerer interner Wellen ist oft an Änderungen der Sohltopografie geknüpft. Basierend auf neuesten dreidimensionalen Aufnahmen dieser Strukturen, ist die Wellengeometrie äußerst variabel über Raum und Zeit. In Abhängigkeit der Stärke des Tidestromes kann das Wellenspektrum von sinuidal-zweidimensional bis asymmetrisch-dreidimensional reichen, und größere Wellenformen von Kleineren überlagert werden (Abb. 2d). Die Grenzflächenanregung kann sich vertikal über mehrere Sedimentlagen erstrecken und ist dabei oft an einen Phasenversatz geknüpft. Die Daten lassen erkennen, dass diese Grenzflächenauslenkungen nicht statisch sind, sondern sowohl mit als auch gegen den Tidestrom migrieren.

Während die Ausbildung flüssiger Schlicke in der Ems oft über weite Bereiche der Sohle erfolgt, ist in der Weser vielmehr ein kleinräumiger Wechsel von schwach konsolidierten Sedimenten und konsolidierter Sohle anzutreffen. Oft beschränken sich derartige Ablagerungen in der Weser auf lokale Vertiefungen. Bei Präsenz flüssiger Schlicke wird die Sohltopografie eingeebnet. Selbst großflächige subaquatische Dünenfelder können dabei in Abhängigkeit von der Dünengröße und den zur Verfügung stehenden Schwebstoffmengen vollständig überlagert werden.

Die Charakteristik der Ablagerungen variieren insgesamt nicht nur vertikal durch Dichtezunahme, Änderungen der Sedimentzusammensetzung und der Viskosität. Vergleichbare Änderungen bzw. Variabilitäten der Charakteristik flüssiger Schlicke über größere Flächen zeichnen sich in den QTC-Daten ab.

5 Schlussfolgerungen

In der Literatur finden sich viele Angaben zur ästuarinen Schwebstoffdynamik, in denen aber meistens aufgrund fehlender Messdaten nur Teilaspekte beleuchtet werden. ADCP-Daten werden, nach teils aufwendiger Kalibrierung des Rückstreusignals, vielfach für Quantifizierungen von Schwebstoffgehalten in der Wassersäule herangezogen. Doch bleibt dabei oft der sohlnahe Bereich ausgespart, da entweder eine akustische Durchdringung in flüssige Schlicke nicht möglich ist, bzw. eine Interpretation der ADCP-Daten ohne Ankopplung an andere Daten die spekulative Ebene nicht verlässt. Oft enden die Aufzeichnungen dort, wo die Ablagerungen flüssiger Schlicke beginnen (Abb. 2b-c). Unter Einbeziehung insbesondere der SES-Daten kann diese Limitierung jedoch nutzbringend sein, da Strukturen wie interne Wellen an Grenzflächen nun auch mit ADCP-Daten interpretierbar werden. Neue Einblicke in die ästuarine Schwebstoffdynamik ergeben sich durch die Kopplung mit Seitensichtsonar- und Fächerecholotdaten. Aussagen zur flächenhaften Verteilung und Ausprägung sohlnaher Suspensionen und flüssiger Schlicke wird damit möglich. Auf Basis dieser räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Daten können Prozesse analysiert und Variationen erstmals in einem neuen Gesamtzusammenhang betrachtet werden. Bilanzierungen lassen sich damit um ein Vielfaches verbessern.

Die aktuellen Studien in Weser und Ems verdeutlichen, dass grundlegende, die Schwebstoffdynamik steuernde Prozesse trotz unterschiedlich hoher Schwebstoffkonzentrationen vergleichbar sind, aber lokale Rahmenbedingungen eine Datenübertragung auf andere Systeme nur eingeschränkt möglich machen.

6 Danksagung

Danken möchten wir der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des in das DFG-Forschungszentrum Ozeanränder Marum eingebundenen Projektes „Suspended Sediment Flux in Engineered Estuaries“, in dem die hier präsentierten Ergebnisse erarbeitet wurden. Ferner richtet sich unser Dank an die Besatzung des FK Senckenberg für ihre tatkräftige Unterstützung sowie an die Firma Innomar GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit.

7 Literatur

BARTHOLOMÄ, A. (2006): Acoustic bottom detection and seabed classification in the German Bight, southern North Sea. – GeoMarine Letters 26: 177-184.

COLLINS, W. & GALLOWAY, J. (1998): Seabed classification and multibeam bathymetry: tools for multidisciplinary mapping. – Sea Technology 39(9): 45-49.

DEINES, M. L. (1999): Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Profilers. – Proceedings of IEEE Sixth Working Conference on Current Measurements: 249 – 253.

DE JONGE, V. DE BOER, F. W. F. & DE JONG, D. J. (2007): What is ecologically more important for the Ems estuary: „climate change or engineering activities“? – Terra Nostra: Tagungsband der Internationalen Konferenz & 97. Jahrestagung der Geologischen Vereinigung e.V. in Bremen, 1.-5. Oktober; Schriften der GeoUnion Alfred-Wegener-Stiftung, Vol. 2007/1-2: S. 125.

Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (2006): Weser- und Emsgebiet 2003. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Norden.

ERNSTSEN, V., NOORMETS, R., HEBBELN, D., BARTHOLOMÄ, A. & FLEMMING, B. W. (2006): Precision of high-resolution multibeam echo sounding coupled with high-accuracy positioning in a shallow water coastal environment. – GeoMarine Letters 26: 141-149.

MEISCHNER, D. & RUMOHR, J (1974): A light-weight, high-momentum gravity corer for subaqueous sediments. – Senckenbergiana maritima 6(1): 105-117.

MÜLLER, H. (1985): Vergleichende Messungen der Sohllage in einem Unterweserquerschnitt innerhalb der Schlickstrecke bei Nordenham. – Die Küste 42: 209-225.

MURDOCH, A. & AZCUE, J. M. (1995): Manual of aquatic sediment sampling. – CRC, Boca Raton, Florida.

SCHROTTKE, K., BARTHOLOMÄ, A. & BECKER, M. (2005): Bed mobility in the Weser estuary turbidity zone. – Hydro International 9(7): 27-29.

SCHROTTKE, K., BECKER, M., BARTHOLOMÄ, A., FLEMMING, B. W. & HEBBELN, D. (2006): Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler. – GeoMarine Letters 26: 185-198.

WUNDERLICH, J. & MÜLLER, S. (2003): High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics. – International Ocean Systems 7(4): 6-11.

Kontakt:
Prof. Dr. Kerstin Schrottke
Universität Kiel
Institut für Geowissenschaften
Exzellenzcluster Future Ocean
Sea-level Rise & Coastal Erosion
Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
Tel.: 0431/ 880 3911
Fax: 0431/ 880 4432
ks@gpi.uni-kiel.de

Geboren 1971 in Hamburg
Fachgebiet: Küstengeologie

1992 – 1997
Geologie Studium an der Universität Kiel

2001
Promotion an der Math.-Nat. Fakultät
der Universität Kiel

Projektarbeit:

2001 – 2002: am Forschungs- und Technologie-zentrum Westküste, in Büsum

2002 – 2007: am DFG Forschungszentrum Ozeanränder Marum (rcom), der Universität Bremen

seit 2008: Leitung der JRG B5-1 Sea-Level Rise & Coastal Erosion des Exzellenzcluster Future Ocean der Universität Kiel

Kontakt:
Dr. Alexander Bartholomä
Forschungsinstitut Senckenberg
Südstrand 40
26382 Wilhelmshaven
Tel.: 04421/ 94 75 210
Fax: 04421/ 94 75 222
abartholomae@senckenberg.de

1987:
Diplom am Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin
1992:
Promotion am Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin

1992-1997
Post Doc am Forschungsinstitut Senckenberg Wilhelmshaven

seit 1997
Fachgebietsleiter Marine Sedimentologie, Abt. für Meeresforschung, Forschungsinstitut Senckenberg

seit 2004
Lehrbeauftragter an Universität Bremen

Forschungsgebiete:
- Transportprozesse marine Sedimentologie
- Meeresgeologie und Küstengeologie, Schwerpunkt Wattsysteme
- Marine Fernerkundung und Hydroakustik

Bodennahe Turbulenzmessungen im Labor und Feld

Alexander Bartholomä und Martina Karle

1 Einleitung

Die Gezeitenflächen der ostfriesischen Watten und Flachstwasserbereiche der Ästuare zeigen komplexe Muster kleinskaliger Sohlformen, Sedimentverteilungen und Besiedlungsmuster makrobenthischer Organismen, die unmittelbar von den vorherrschenden Strömungen und Wellen kontrolliert werden (z. B. FLEMMING & ZIEGLER 1995, FLEMMING & BARTHOLOMÄ 1997, WILLIAMS 1999, TILCH 2003). Hierbei ist vor allem der Welleneinfluss im Flachwasser aufgrund höherer bodennaher Wellenorbitalgeschwindigkeiten für die Remobilisierung der Sedimente von Bedeutung. Die im Gegensatz zur der durch Wellen generierten Strömung generierte dünnere, bodennahe Grenzschicht führt zur deutlich höheren Schubspannungswerten bei gleicher Fließgeschwindigkeit (FREDSØE & DEIGAARD 1992, SOULSBY 1997). Die meisten Modelle zur Berechnung der Sohlschubspannung basieren jedoch auf rein hydrodynamischen Annahmen. Der biologische Einfluss im Sinne einer Biostabilisierung wurde bisher nur selten berücksichtigt (z. B. BORJSE et al. 2007). Für die Geschwindigkeitsmessungen wurden im Feld neben Pulse Coherent/Acoustic Doppler Profiler (PC/ADP) (LACY & SHERWOOD 2004) vor allem Acoustic Doppler Velocitymeter (ADV) (WILLIAMS et al. 2003) angewendet, die zum Teil mit Acoustic Backscatter Systemen (ABS) kombiniert wurden (BETTERIDGE et al. 2001, WILLIAMS et al. 2003). Für die zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Messungen der bodennahen Transportprozesse in der vorliegenden Arbeit wurden in einem Strömungs-/Wellenkanal und in Feldeinsätzen die bodennahen Geschwindigkeiten mit einem ADV und die entsprechend notwendige hochaufgelöste Topografie mit einem ABS an verschiedenen natürlichen Sedimenten untersucht (KARLE 2008).

2 Methodik

Die Geschwindigkeiten wurden mit einem 16 MHz-Acoustic Doppler Velocity (ADV) vorrangig bodennah als auch profilierend von der Sohle bis in eine Höhe von 25 cm über Grund gemessen. Das für die Topografie eingesetzte ABS umfasst zwei Systemkomponenten. Ein Drei-Frequenz-Echolot erlaubt, die Profile der Wassersäule sowie die Position der Sedimentoberfläche mit einer hohen zeitlichen (~0,1 s) und räumlichen (~0,25 cm) Auflösung zu messen. Für die räumliche Erfassung der Oberfläche wurde das vierte Echolot als Seitensichtsonar eingesetzt, in dem es auf einem Messschlitten linear bewegt wurde und Bilder der

Sedimentoberfläche mit einer räumlichen Auflösung im Millimeterbereich lieferte (Abb. 1). Dieses speziell entwickelte Verfahren bot erstmals die Möglichkeit, *in situ* hochauflösend Sohlbewegungen zu quantifizieren.

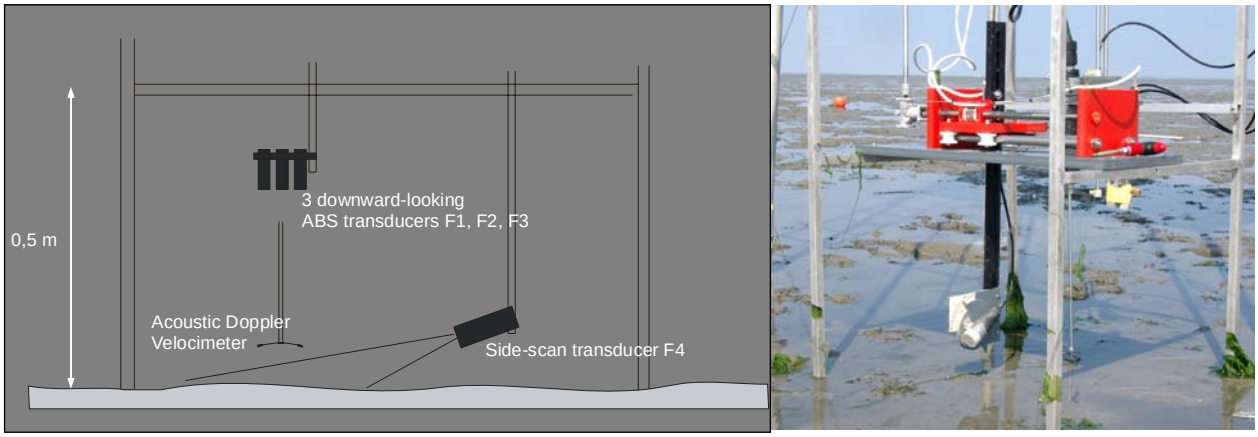


Abb. 1: Multifrequenz *Acoustic Backscatter Systems* (ABS) mit drei vertikal messenden Gebern für die Höhen- und Rückstreumessung (Suspension) und ein Geber in gekippter Position, linear bewegt zur Erfassung von morphologischen Veränderungen an der Sedimentoberfläche

Jeder der vier akustischen Geber arbeitet mit einer Grundfrequenz von 80 Hz. Bei der hier benutzten reduzierten Messzellengröße von 2,5 mm wird pro Profil eine maximale Reichweite von 32 cm erzielt. Der gekippte, als Seitensichtsonar arbeitende Sensor erlaubt bei der willkürlich definierten Montagehöhe von 10 cm die Abtastung einer Messfläche von 30 x 40 cm. Die Serie einzelner Flächenbilder zeigt die zeitliche Variabilität der Sohlformdynamik. Neben der Topografie liefert das ABS Rückstreuwerte, deren Intensität als ein Maß für die Suspensionsdynamik genutzt wurde.

3 Ergebnisse

Für die Experimente im Kanal und im Feld konnten mit der für beide Messreihen gleichen Systemkonfiguration die jeweiligen Grenzwerte für die Remobilisierung verschiedener Sedimenttypen für einen Korngrößenbereich von 63 µm und 180 µm ermittelt werden. Die kritischen hydraulischen Bedingungen wurden mit Hilfe der turbulenten kinetischen Energie, der Sohlschubspannung und dem Reynold-Stress definiert. Dabei zeigte sich in den natürlichen Sedimenten im Watt in allen Fällen eine deutlich höhere Oberflächenresistenz im Vergleich zu den in den Kanal eingebrachten „sterilen“ Sedimenten (ohne organischen Anteil) aus den jeweiligen Wattgebieten. Die kritischen Erosionsgeschwindigkeiten lagen im Feld 50 % über denen im Kanal bei überwiegend strömungskontrollierten Bedingungen. Diese deutlich erhöhten Werte sind im Wesentlichen auf die immer wieder auftretende Biostabilisierung von Diatomeen-Rasen zurückzuführen, die vor allem während der Sommermonate die Wattflächen besiedeln (GERDES et al. 1985). Erst mit zunehmendem Welleneinfluss wird im Rückseitenwatt, bei Windstärken um 6 Bft, diese Schutzwirkung aufgehoben. Durch die Wellen

nimmt die turbulente kinetische Energie auf bis zu 150 cm²/s² deutlich zu (Abb. 2). Die Stärke der Welleneinwirkung ist dabei stark abhängig von der Tidephase und der windrichtungsabhängigen Fetch-Längen. So treten bei Stauhochwasser, wenn die Wellenhöhe ihr Maximum erreicht und durch Grundberührung die maximale Scherkraft an der Sedimentsohle ausübt, maximale Werte von Orbitalgeschwindigkeit und turbulenter kinetischer Energie auf. Gleichzeitig auftretende erhöhte Rückstreuwerte des ABS zeigen deutlich erhöhte Suspensionsgehalte an.

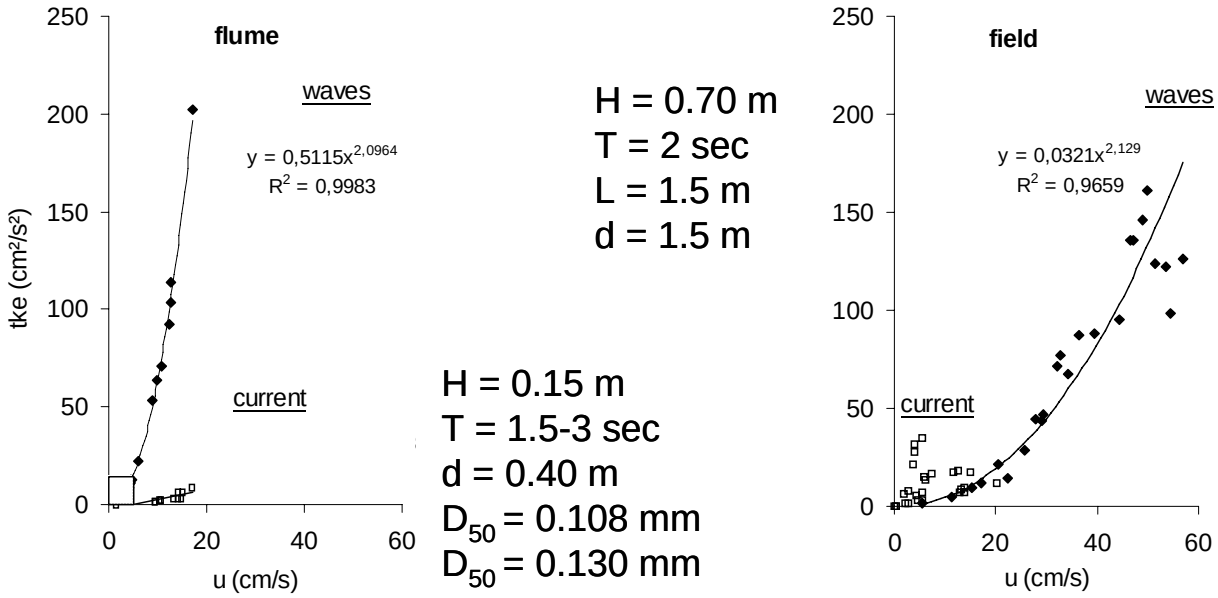


Abb. 2: Korrelation zwischen turbulenter kinetischer Energie (tke) und Fließgeschwindigkeit (u) unter einseitig gerichteter Strömung sowie mit wellenüberlagerter Strömung im Kanal (links) und im Feld (rechts). Sowohl im Kanal als auch im Feld findet nur durch den Welleneinfluss eine Remobilisierung der Sedimente statt.

Unter ruhigen Wetterverhältnissen ohne Wellentätigkeit sind die bodennahen Strömungsgeschwindigkeiten allein tidendominiert. Bei Geschwindigkeiten von bis zu 20 cm/s wurden die im Kanal ermittelten kritischen Werte der turbulenten kinetischen Energie von 50 cm²/s² für die Mobilisierung der Sedimentsohle nicht überschritten. Verbunden mit den geringen Rückstreuwerten zeigen die Feldmessungen, dass unter überwiegend Tidenstrom-dominierten Bedingungen im Watt praktisch keine Remobilisierung auf den Wattflächen stattfindet. Die Ergebnisse aus dem ostfriesischen Rückseitenwatt korrelieren gut mit ähnlichen Untersuchungen aus niederländischen und britischen Wattsystemen (z. B. WILLIAMS et al. 1999, 2003; POPE et al. 2006), variieren jedoch in den Sohlschubspannungswerten in Abhängigkeit der sedimentspezifischen Sohlrauhigkeit.

4 Zusammenfassung

Im Rückseitenwatt der Insel Spiekeroog im Ostfriesischen Wattenmeer wurde auf verschieden stark exponierten Wattflächen die beginnende Erosion von Wattsedimenten und Effekte der Biostabilisierung während der Überflutungsphase untersucht. Dabei konnten die kritischen Werte für die turbulente kinetische Energie und den Reynold-Stress bei einsetzender Erosion anhand von bodennah aufgezeichneten, dreidimensionalen Strömungsdaten eines Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) berechnet werden. Die lokal auftretende Sedimentmobilisierung spiegelt sich in der kleinskaligen Veränderung des Oberflächenreliefs wider, die über die hoch aufgelösten Echolotprofile und Seitensichtsonardaten eines im Megahertz-Bereich arbeitenden Acoustic Backscatter Systems (ABS) erfasst wurden. Um den Einfluss der Biostabilisierung auf die beginnende Remobilisierung der Wattensedimente zu beurteilen, wurde mit der gleichen Systemkonfiguration vor den *in-situ*-Messungen an gleichen, aber organisch „sterilen“ Wattsedimenten Messungen im Strömungs- und Wellenkanal durchgeführt.

Literatur

BETTERIDGE, K. F. E., THORNE, P. & P. S. BELL, 2002: Assessment of Acoustic Coherent Doppler and Cross-Correlation Techniques for Measuring Near-Bed Velocity and Suspended Sediment Profiles in the Marine Environment. J. Atmosph. Ocean. Tech. 19: 367-380.

BORSJE, B. W., HULSCHER, S. J. M. H., DE VRIES, M. B. & G. J. DE BOER, 2007: Modelling large scale cohesive sediment transport by including biological activity. in Dohmen-Janssen & Hulscher (eds) *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2007* – © 2008 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-45363-9: 255-262.

FLEMMING, B. W. & A. BARTHOLOMÄ, 1997: Response of the Wadden Sea to a rising sea level: a predictive empirical model. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 49(1/2): 1-11.

FLEMMING, B. W. & K. ZIEGLER, 1995: High-resolution grain size patterns and textural trends in the backbarrier environment of Spiekeroog Island (Southern North Sea). Senckenbergiana maritima, 26(1/2): 1-24.

FREDSØE, J., & R. DEIGAARD, 1992: Mechanics of Coastal Sediment Transport. Adv. Ser. Ocean Eng. 3: 369 pp., World Sci., Hackensack, N. J.

GERDES, G., KRUMBEIN, W. E. & H.-E. REINECK, 1985: Verbreitung und aktuogeologische Bedeutung mariner mikrobieller Matten im Gezeitenbereich der Nordsee. Facies, 12: 75-96.

KARLE, M., 2008: Turbulenzgesteuertes Erosionsverhalten von Wattsedimenten am Beispiel des Rückseitenwatts der Insel Spiekeroog – Untersuchungen mit hochauflösender Sonartechnik, Elect. Pub.: (//archive.ub.uni-marburg.de/diss/z2008/0083/pdf/mk.pdf), Univ. Marburg, 108 pp.

LACY, J. & C. R. SHERWOOD, 2004: Accuracy of a pulse-coherent Acoustic Doppler Profiler in a wave-dominated flow. J. Atmosph. Ocean. Tech. 21: 1448-1461

POPE, N. D., WIDDOWS, J. & M. D.BRINSLEY, 2006: Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach—A comparison of annular flume and field data. Cont. Shelf Res. 26: 959–970

Tilch, E., 2003: Oszillation von Wattflächen und deren fossiles Erhaltungspotential (Spiekerooger Rückseitenwatt, südliche Nordsee). Berichte, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen, 222: 137pp.

WILLIAMS, J. J., BELL, P. S. & P. D. THORNE, 2003: Field measurements of flow fields and sediment transport above mobile bed forms. J. Geophys. Res. 108, C4, 3109, doi:10.1029/2002JC001336.

WILLIAMS, J. J., ROSE, C. P., THORNE, P. D., O'CONNOR, B. A., HUMPHREY, J. D., HARDCASTLE, P. J., MOORES, S. P., COOKE, J. A. & D. J. WILSON, 1999: Field observations and predictions of bed shear stresses and vertical suspended sediment concentration profiles in wave-current conditions. Cont. Shelf Res., 19: 507-536.

Kontakt:
Dr. Alexander Bartholomä
Forschungsinstitut Senckenberg
Südstrand 40
26382 Wilhelmshaven
Tel.: 04421/ 94 75 210
Fax: 04421/ 94 75 222
abartholomae@senckenberg.de

1987:
Diplom am Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin
1992:
Promotion am Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin

1992-1997
Post Doc am Forschungsinstitut Senckenberg Wilhelmshaven

seit 1997
Fachgebietsleiter Marine Sedimentologie, Abt. für Meeresforschung, Forschungsinstitut Senckenberg

seit 2004
Lehrbeauftragter an Universität Bremen

Forschungsgebiete:
- Transportprozesse marine Sedimentologie
- Meeresgeologie und Küstengeologie, Schwerpunkt Wattsysteme
- Marine Fernerkundung und Hydroakustik

Kontakt:
Dr. Martina Karle
Forschungsinstitut Senckenberg
Südstrand 40
26382 Wilhelmshaven
Tel.: 04421/ 94 75 212
Fax: 04421/ 94 75 222
mkarle@senckenberg.de

1998:
Diplom am Fachbereich Geowissenschaften, Philipps-Universität Marburg
2008:
Promotion an der Philipps-Universität Marburg

1998 - 2003
Wiss. Angestellte am Fachbereich Geowissenschaften der Philipps-Universität Marburg

seit 2004
Wiss. Angestellte im Fachgebiet Marine Sedimentologie, Abt. für Meeresforschung, Forschungsinstitut Senckenberg

Forschungsgebiete:
- klastische Sedimentologie
- Meeresgeologie und Küstengeologie,
- Hydroakustik im Flachwasserbereich

Ultraschall-Strömungsmessungen für Funktionskontrollen von Fischwanderhilfen

Carsten Wirtz

1 Einleitung

Viele Fließgewässer in Mitteleuropa weisen Querverbauungen auf, welche die longitudinale Durchgängigkeit wesentlich beeinträchtigen. Um die von der EU-Wasserrahmenrichtlinie geforderten guten ökologischen Zustände zu erreichen, werden deshalb Fischwanderhilfen (FWH) eingerichtet. Damit soll wandernden Fischarten sowie weniger mobilen benthalen Arten das Erreichen der für die verschiedenen Lebenszyklen notwendigen Habitate ermöglicht werden. Für die Durchgängigkeit sind insbesondere die Auffindbarkeit und Passierbarkeit von Bedeutung. Beide Parameter sind mit der Strömung verknüpft, welche wiederum vom Gefälle abhängt. Auf der Basis geometrischer und hydraulischer Eigenschaften der Fischtreppen wie Schlitzbreiten, Beckenmaße, Anzahl und Anordnung der Becken, Absturzhöhen zwischen den Becken u. a. lassen sich Fließgeschwindigkeiten und spezifische Leistungen rechnerisch ableiten und mit den Vorgaben von DVWK (1996) und MUNLR (2005) vergleichen. Die Praxis zeigt jedoch, dass aufgrund komplexer Strömungsverhältnisse in den FWH sowie nicht vorhersehbarer Randbedingungen wie z. B. der Anordnung von Störsteinen, möglichen Verklausungen und starken Turbulenzen nicht immer Übereinstimmungen von angestrebten Werten und festgestellten Messresultaten erreicht werden. Insofern sind neben biologischen Untersuchungen auch hydraulische Messungen sinnvoll, um die Funktionsfähigkeit besser quantifizieren und mit den Erfordernissen abgleichen zu können.

2 Erfassung von Fließgeschwindigkeiten für eine Beurteilung der Funktionsfähigkeit von FWH

In Fließgewässern konzentrieren sich Messungen häufig auf die Ermittlung von Durchfluss und Wasserständen. Fließgeschwindigkeiten, insbesondere in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, werden vor allem in Laboratorien oder bei Naturmessungen für wissenschaftliche Fragestellungen erhoben. Eine praktische Anwendung in diesem Zusammenhang stellt die Erfassung dreidimensionaler Strömungen in FWH dar. Vor allem hoch auflösende punktuelle Messungen ermöglichen Beschreibungen von Strömungsverhältnissen, welche weiterführende Analysen, bspw. unter Berücksichtigung von Instationaritäten, die Ermittlung statistischer Kenngrößen innerhalb eines Messzeitraums sowie der Geschwindigkeitsverteilung in den Becken, im Wanderkorridor und in den Schlitzen ermöglichen.

2.1 Messmethodik

Die Erfassung der Hydraulik erfolgt mittels Strömungsmessungen bei mehreren im Jahresverlauf repräsentativen Abflüssen und in der Regel im obersten und untersten, bei längeren FWH auch in einem mittleren Becken. Dabei wird innerhalb der Becken an unterschiedlichen Punkten (z. B. unterhalb der Schlitzöffnungen, an stark durchströmten und strömungsberuhigten Stellen) zumeist oberflächennah, in mittlerer Tiefe und sohlennah gemessen.

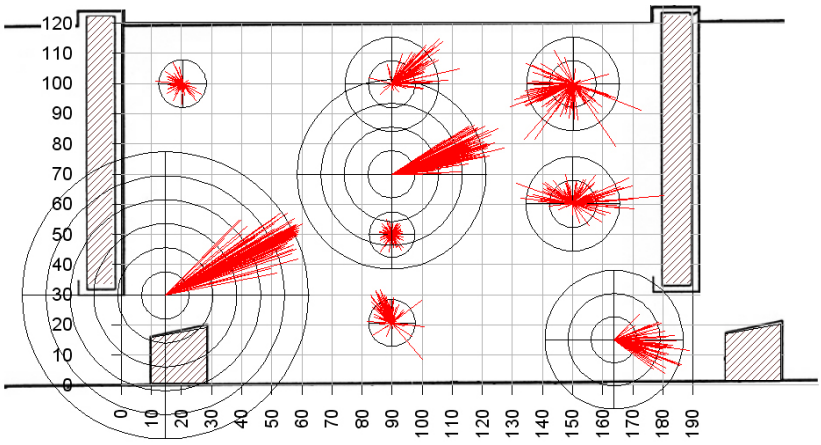
Abb. 1 und 2: Strömungsmessungen in einer FWH an der Neiße bei Forst

Zum Einsatz kommt die Methode der Ultraschall-Velocimetrie (punktuelle Messungen, pulse-coherent-Verfahren). Die Vorteile liegen in der hoch aufgelösten Erfassung der dreidimensionalen Strömung (x-, y-, z- Komponenten). Im Gegensatz z. B. zu Flügelmessungen ergibt sich unter allen Bedingungen die resultierende Strömungsgeschwindigkeit und -richtung, welche bei Flügelmessungen nur bei permanenter korrekter Ausrichtung in die Strömung gewährleistet ist, da sonst eine seitliche oder sogar rückwärtige Anströmung erfolgen kann. Weiterhin können aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung Turbulenzen und Strömungsschwankungen sowie Richtungsänderungen erfasst werden, welche bei anderen Verfahren herausgemittelt werden. Die hohen Datendichten ermöglichen darüber hinaus, im Zusammenhang mit weiteren Parametern (Körnung des Substrates, Wassertiefen, Gefälle, Abständen zu Sohlen oder seitlichen Begrenzungen), die Berechnung von Strömungsphänomenen, welche für die Beurteilung von Fließgewässerabschnitten herangezogen werden können. Zu nennen sind beispielsweise die Relation zur Störwellengeschwindigkeit (Froude-Zahl) zur Beurteilung strömenden oder schießenden Wassers, das Ausmaß von Turbulenzen (Reynolds-Zahl) oder Schubspannungen zur Quantifizierung der Scherkräfte an der Sohle.

Da die Fließgeschwindigkeiten üblicherweise mit 10 bis 25 Hertz über einen Zeitraum von 2 bis 3 Minuten gemessen werden, liegt pro Messpunkt eine ausreichende Datenmenge vor, um Belastungen unter turbulenten Bedingungen für Fische feststellen zu können. Dem dienen Analysen kumulierter Häufigkeiten und Perzentilwerte bestimmter Geschwindigkeiten.

2.2 Ergebnisse

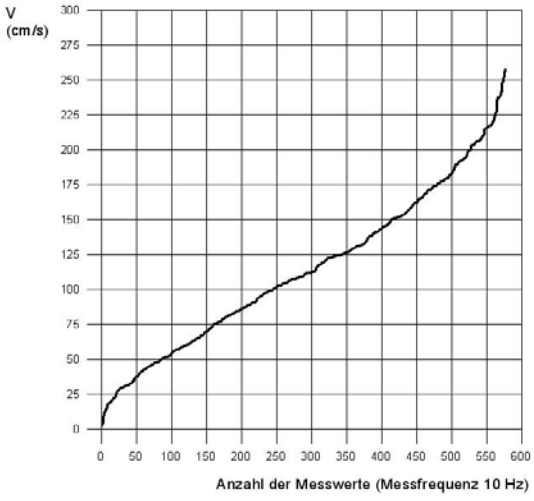
Einen ersten Überblick der räumlichen Differenzierung von Strömungen geben Grafiken, in welchen Fließgeschwindigkeiten und –richtungen als Rosen in Pläne der Fischtreppen integriert sind (Abb. 3). Die Anteile unterschiedlicher Strömungsbereiche, wie die Schlitze, der Wanderkorridor, also in etwa die Linie zwischen den Schlitzen, und strömungsberuhigte Ruhezonen können mittles der räumlich verteilten Messungen quantifiziert werden. Die Verteilung der Strömungsvektoren innerhalb der jeweiligen Strömungsrosen veranschaulichen Turbulenzen an den Messstellen, welche die Orientierung für wandernde Individuen oft erheblich erschwert.



Der Abstand zwischen den Kreisen entspricht vom Mittelpunkt aus zunehmenden 25 cm/s. Jeder rote Teilstrich entspricht dem gemittelten Geschwindigkeitsvektor einer Sekunde.

Abb. 3: Oberflächennahe Strömungen eines Schlitzpasses im Spreewald

Die ungleichmäßig verteilten Strömungen werden auch anhand kumulierter Häufigkeiten der Strömungsgeschwindigkeiten deutlich. Die Abbildungen 4 und 5 enthalten hier die Häufigkeiten innerhalb von einminütigen Messintervallen an einer mittigen und einer oberhalb eines Schlitzes gelegenen Messstelle. Während im zentralen Bereich aufgrund von Turbulenzen und Überlagerungen verschiedener Strömungen unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten auftreten, sind diese am Austritt des Beckens, also oberhalb des Schlitzes zum nächsten unterstrom liegenden Becken, wesentlich gleichmäßiger und ausgeglichener.



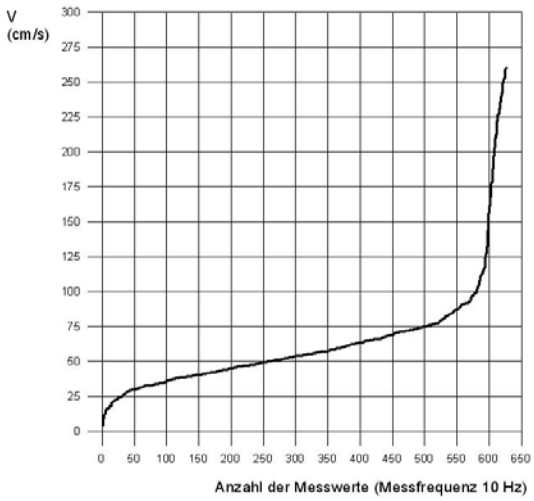


Abb. 4 und 5: Kumulierte Häufigkeiten oberflächennaher Strömungen innerhalb eines Wanderkorridors einer FWH an der Schwarzen Elster. Links eine zentral gelegene Messstelle und rechts eine Messstelle nahe des Austritts aus dem Becken.

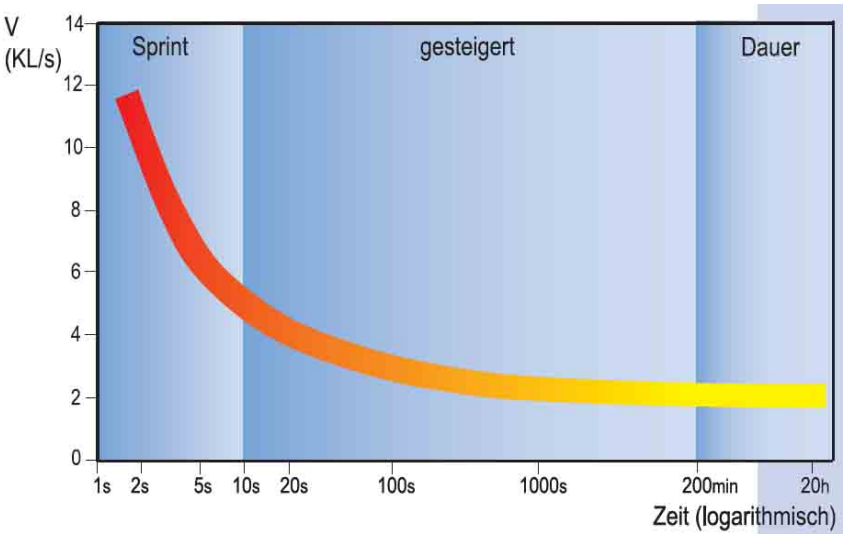


Abb. 6: Schwimmleistung von Fischen: Geschwindigkeit in Körperlängen pro Sekunde (aus: MUNLV 2005)

Abbildung 6 verdeutlicht unterschiedliche Schwimmgeschwindigkeiten von Fischen, welche sich in Sprintgeschwindigkeit, gesteigerte Geschwindigkeit und Dauergeschwindigkeit unterteilt. Das Leistungsvermögen der Fische ist von der Körperlänge abhängig, weshalb die Geschwindigkeit in Körperlänge pro Sekunde angegeben ist. Sprintgeschwindigkeiten mit Strecken von bis zu 12-facher Körperlänge pro Sekunde können nur bis etwa 2 Sekunden aufrecht gehalten werden, während die gesteigerte Geschwindigkeit ca. 3 Stunden geleistet werden kann.

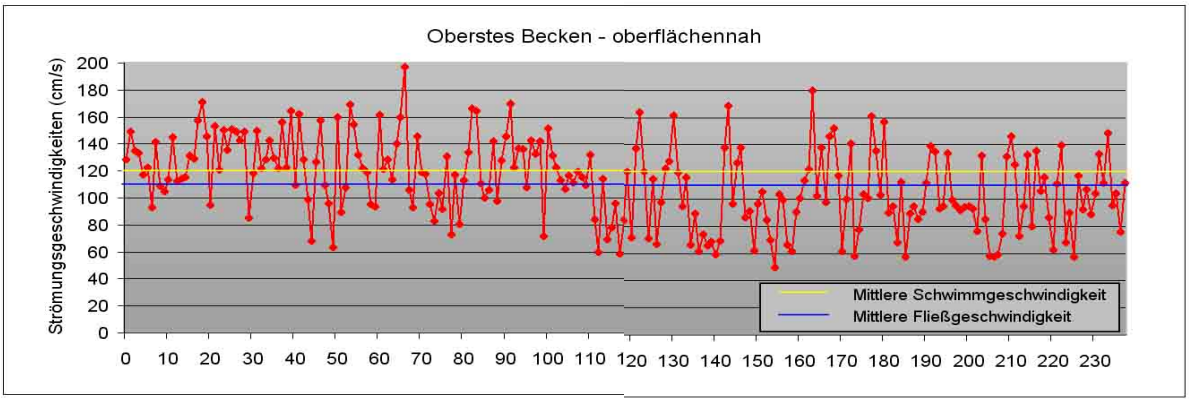


Abb. 7: Instationäre Strömungen unterhalb eines Schlitzes über eine Messdauer von 240 Sekunden

In der Praxis bedeutet dies, dass die alleinige Betrachtung von Mittelwerten, zumindest in Fällen unstetiger Strömungen, die Passierbarkeit, z. B. eines Schlitzes, nur unzureichend beschreibt. Abbildung 7 stellt die Fließgeschwindigkeiten innerhalb eines Schlitzes der kurzfristigen Sprintgeschwindigkeit eines etwa 10 cm langen Fisches gegenüber. Die Sprintgeschwindigkeit liegt über der mittleren Fließgeschwindigkeit. Insofern könnte der Schlitz als passierbar beurteilt werden. Bei Berücksichtigung der Strömungsschwankungen innerhalb des Beobachtungszeitraums ergibt sich allerdings, dass nur während weniger und kurzer Phasen eine Passage möglich ist. Es ist fraglich, ob sich Fische ausreichend lange in einer Warteposi-

tion halten können oder eventuell zufällig den richtigen Moment abpassen. Die Beurteilung der FWH muss unter diesen erweiterten Betrachtungen also kritischer ausfallen (FREDRICH & WIRTZ 2005).

3 Zusammenfassung

Strömungsmessungen, insbesondere mittels zeitlich und räumlich hoch auflösender und punktueller Ultraschall-Velocimetrie, erweitern die Aussagefähigkeit von Funktionskontrollen von Fischwanderhilfen erheblich. Neben der Lokalisierung und Quantifizierung von Strömungsbereichen wie Ruhezonen, Wirbeln und Walzen und Abschnitten mit hohen Strömungen bietet die exakte Erfassung von kontinuierlichen sowie wechselnden Strömungsrichtungen die Möglichkeit zu beurteilen, inwiefern Ansprüche wandernder Fischarten an eine Leitströmung als Orientierungshilfe erfüllt werden. Die unter den turbulenten Verhältnissen häufigen Instationaritäten lassen sich bei Messfrequenzen von bis zu 25 Hertz und somit großen Datenmengen innerhalb von Beobachtungszeiträumen von wenigen Minuten mittels statistischer Kenngrößen gut beschreiben. Weiterhin bietet die Erfassung unstetiger Strömungen die Möglichkeit, Gunst- und Ungunstphasen abzugrenzen und deren Dauer zusätzlich zu mittleren Fließgeschwindigkeiten sowie auftretenden Maxima und Minima einzubeziehen. Ursachen für nach biologischen Untersuchungen kritisch ausfallende Einschätzungen lassen sich auf dieser Basis leichter identifizieren und Änderungsvorschläge gezielter erarbeiten.

Literatur

ATV-DVWK: Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle. – Hrsg.: ATV-DVWK – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, ISBN 3-934063-91-5, 256 S., 2004

DVWK-Merkblatt 232/1996: „Fischaufstiegsanlagen - Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle“, 1996

FREDRICH, F., WIRTZ, C.: Effizienzkontrolle der Fischwanderhilfe am neuerbauten Spreewehr Beeskow. Gutachten im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg, 2001, 77 S.

FREDRICH, F., WIRTZ, C.: Funktionskontrolle der Fischaufstiegsanlage am Wehr Bad Liebenwerda in der Schwarze Elster. Gutachten im Auftrag der STRABAG, 2005, 71 S.

FREDRICH, F.: Funktionskontrolle (Fischaufstieg) des Vertical-Slot-Passes am Wehr 55 in Burg im Rahmen des DBU_Pilotprojektes „Borstenanlagen im Spreewald. Gutachten im Auftrag des LUA Brandenburg, 2006, 61 S.

FREDRICH, F, WIRTZ, C.. Funktionskontrolle der Fischaufstiegsanlagen an den Spreewehren Kiekebusch und Spremberg. Gutachten im Auftrag des LUA Brandenburg, 2007, 65 S.

FREDRICH, F, WIRTZ, C.: Funktionskontrolle der Fischaufstiegsanlage an der Gewitterschleuse (Wehr 23) im Leineweberfließ Gewitterschleuse. Gutachten im Auftrag des TWB Boblitz, 2007, 45 S.

FREDRICH, F., WOLTER, C. & WEIDNER, T.: Die Löcknitz seit 500 Jahren wieder durchgängig. Broschüre im Auftrag des Wasser- und Landschaftspflegeverbandes „Untere Spree“, 2007

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen – MUNLV: „Handbuch Querbauwerke“, 2005

Kontakt:
Dr. Dipl.-Geogr. Carsten Wirtz
terra4 – Gesellschaft für
Geosystemanalyse mbH
Rungestraße 22-24
10179 Berlin
Tel.: 030/ 280 91 678
Mobil: 0173-8578209
Fax: 030/ 288 73 874
wirtz@terra4.de

Jahrgang: 1964

1985 – 1993
Studium der Geographie, Biologie und Volkswirtschaftslehre an der Universität Heidelberg

1997 – 2002
Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Freien Universität Berlin:

Projektbearbeitung im Rahmen eines BMBF-Verbundprojektes zur Elbeökologie.

Untersuchungen wasserbaulicher Einrichtungen an Elbe und Oder im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau

2004
Promotion: Hydromorphologische und morphodynamische Analyse von Buhnenfeldern der unteren Mittelelbe im Hinblick auf eine ökologische Gewässerunterhaltung

Seit 2002:
Freiberufliche Tätigkeit als Geowissenschaftler. Projektbearbeitung u. a.:

Untersuchung von Fischwanderhilfen an Schwarzer Elster, Spree, Pulsnitz, Neiße und im Spreewald im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg, der STRABAG und des TWB Boblitz

Untersuchung zur Morphodynamik von Retentionsflächen am Oberrhein im Auftrag der Freien Universität Berlin und des Regierungspräsidiums Freiburg

Untersuchungen „Hydromorphologische Referenzen in Fließgewässern“ im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt Schleswig-Holstein

Großflächige Geschwindigkeitsaufnahmen mittels ADCP – Durchführung und Möglichkeiten

Roland Schmid und Harald Niesler

1 Einleitung

Strömungsmessungen mittels ADCP-Verfahren haben sich in den letzten Jahren bei der Erhebung von Naturdaten etabliert. Neben der Bestimmung von Durchflussmengen und hieraus abgeleiteten W-Q-Beziehungen gibt es eine Vielzahl weiterer Einsatzmöglichkeiten für ADCP-Messungen. Ein Vorteil der ADCP-Messtechnik ist, dass in kurzer Zeit eine hohe Messwertdichte und –güte erreicht werden kann. Hierdurch ist es erstmals möglich, die Fließgeschwindigkeiten über große Flächen zeitnah aufzunehmen.

Im Rahmen dieses Vortrags wird ein kurzer Einblick in die ADCP-Messtechnik gegeben. Anschließend wird auf die Durchführung und Auswertung großflächiger Geschwindigkeitsaufnahmen eingegangen und es werden anhand von drei praktischen Beispielen die verschiedenen Möglichkeiten aufgezeigt.

2 Messtechnik

Der ADCP misst die Fließgeschwindigkeiten nach dem Doppler-Prinzip. Er sendet Ultraschallimpulse aus, die von Partikeln im Wasser, z. B. Schwebstoffen, reflektiert und als Echo wieder empfangen werden. Bewegen sich diese Partikel relativ in Richtung des Schallstrahls, so weisen die Echos eine Frequenzverschiebung, die sog. Dopplerverschiebung auf. Aus der Dopplerverschiebung wird die Geschwindigkeit der Partikel berechnet. Das Messprinzip geht davon aus, dass sich die Partikel im Mittel mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen wie die sie umgebende Strömung. Über die Laufzeit der Echosignale werden die Geschwindigkeitsinformationen einer bestimmten Tiefe zugeordnet. Die Geschwindigkeitsinformationen werden in Tiefenzellen zusammengefasst und gemittelt. Für jede Tiefenzelle wird ein 3-dimensionaler Geschwindigkeitsvektor bestimmt. Als Ergebnis wird ein vollständiges lotrechtes Geschwindigkeitsprofil ausgegeben, welches als Ensemble bezeichnet wird (Abb. 1).

Im Nahbereich der Ultraschallsensoren können keine Fließgeschwindigkeiten erfasst werden (Blanking Distance), da hier das Zeitintervall zwischen Sendeimpuls und Echoempfang zu klein ist. Auch im Nahbereich der Sohle werden keine Fließgeschwindigkeiten erfasst. Der Grund hierfür ist, dass die Signale der Sohlenechos und der Partikelechos durch die Geräte-

elektronik nicht hinreichend genau getrennt werden können. Die Größe der nicht erfassten Bereiche ist abhängig von der Konfiguration des ADCP. Nicht erfasste Bereiche werden durch entsprechende Verfahren extrapoliert.

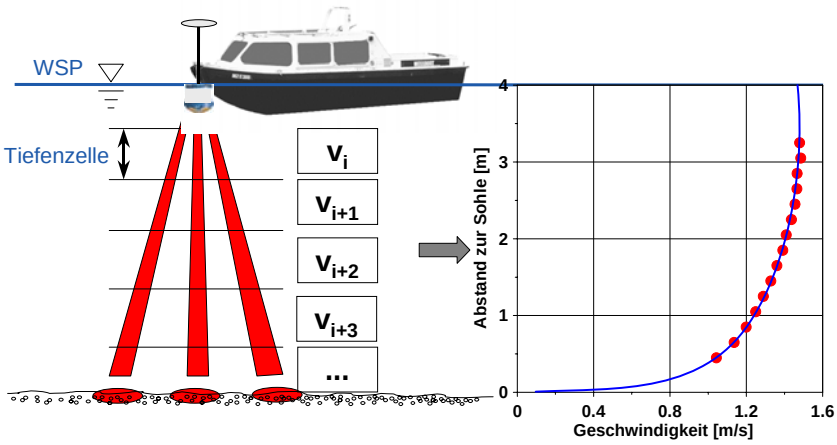


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messprinzips des ADCP mit Aufteilung der Messwerte in Tiefenzellen

Der ADCP misst die Geschwindigkeiten relativ zu sich selbst. Bei einer ortsfesten Messung sind diese Geschwindigkeiten gleich den Fließgeschwindigkeiten. Wird der ADCP bewegt, so müssen die gemessenen Geschwindigkeiten vektoriell um die Geschwindigkeit des ADCP korrigiert werden. Hierfür wurde vom Hersteller das sog. Bottom-Track Verfahren entwickelt. Es werden spezielle Ultraschallimpulse zu Sohle ausgesendet (sog. Bottom-Track-Pings), durch die der ADCP seine Bewegung über Grund bestimmt. Die Fließgeschwindigkeiten werden um den Bewegungsvektor des Gerätes korrigiert und direkt ausgegeben. Bei bewegter Sohle (z. B. durch Geschiebe) kann das Bottom-Track Verfahren zu verfälschten Ergebnissen führen. Die Bewegung der Sohle wird vom Messgerät als eine stromauf gerichtete Bewegung des Gerätes interpretiert. Die ausgegebenen Geschwindigkeitsvektoren sind in diesem Fall kleiner als die tatsächlichen Fließgeschwindigkeiten (ORLOVIUS & HENNING 2005). Eine Möglichkeit der Korrektur der Geschwindigkeiten bietet der Einsatz von DGPS. Der Bewegungsvektor des Gerätes wird hierbei mittels DGPS bestimmt und zur Berichtigung der Fließgeschwindigkeiten verwendet.

Eine ausführlichere Beschreibung der ADCP-Messtechnik findet sich u. a. bei (SIMPSON 2001).

3 Durchführung

Die Durchführung einer flächigen Geschwindigkeitsaufnahme erfolgt im Moving Boat Doppler Verfahren (ADLER 2005). Der ADCP wird an einer absenkbaren Halterung am Bug des Bootes angebracht und zeichnet kontinuierlich die Strömungsgeschwindigkeiten auf. Die Geschwindigkeitsaufnahme erfolgt entweder als Rasteraufnahme im Gewässer oder als Reihe dicht angeordneter Profilmessungen.

Für die Qualität der Messung ist die genaue Kenntnis des Ortes der Messung sowohl zur Orientierung während der Durchführung, als auch für den Ortsbezug bei der späteren Aufbereitung der Messdaten von entscheidender Bedeutung (Referenzierung der Geschwindigkeiten). Die erforderliche Genauigkeit wird mit dem differenziellen GPS-Verfahren erreicht, wobei eine Referenzstation an Land zeitgleich mit der Messung im Gewässer betrieben wird. Zur Ortung und Referenzierung der Fließgeschwindigkeiten wird eine DGPS-Antenne in der Achse des ADCP angebracht.

Die augenblickliche Position des ADCP wird dem Bootsführer in Echtzeit auf einem Bildschirm dargestellt (Realtime Messung). Auf dem Bildschirm kann auch eine Strecke oder ein Kurs eingegeben werden, den der ADCP nehmen soll, beispielsweise ein Quer- oder Längsprofil oder ein Raster im Gewässer. Es werden dem Bootsführer ständig seine Entfernung zum Ufer, die lotrechte Entfernung zur vorgegebenen Strecke und/oder seine Entfernung zu einer vorgewählten Markierung, einem Punkt im Fluss oder an Land, auf dem Bildschirm angezeigt. Darüber hinaus können digitale Karten hinterlegt werden, was insbesondere bei Hochwassermessungen mit überströmten Vorländern unverzichtbar ist.

Entsprechend der Aufgabenstellung wird der vorgegebene Bootskurs mit Hilfe der Realtime-Darstellung abgefahren. Dies stellt hohe Ansprüche an die Fähigkeiten des Bootsführers, da der Fluss einerseits mit möglichst geringer Bootsgeschwindigkeit gequert werden muss und andererseits die Abweichung von der vorgewählten Strecke so gering wie möglich gehalten werden soll. Die unterschiedlich hohen Fließgeschwindigkeiten in Ufernähe, in Buhnenfeldern und im Fluss selbst erfordern von dem Bootsführer große Geschicklichkeit und gute Beherrschung des Bootes.

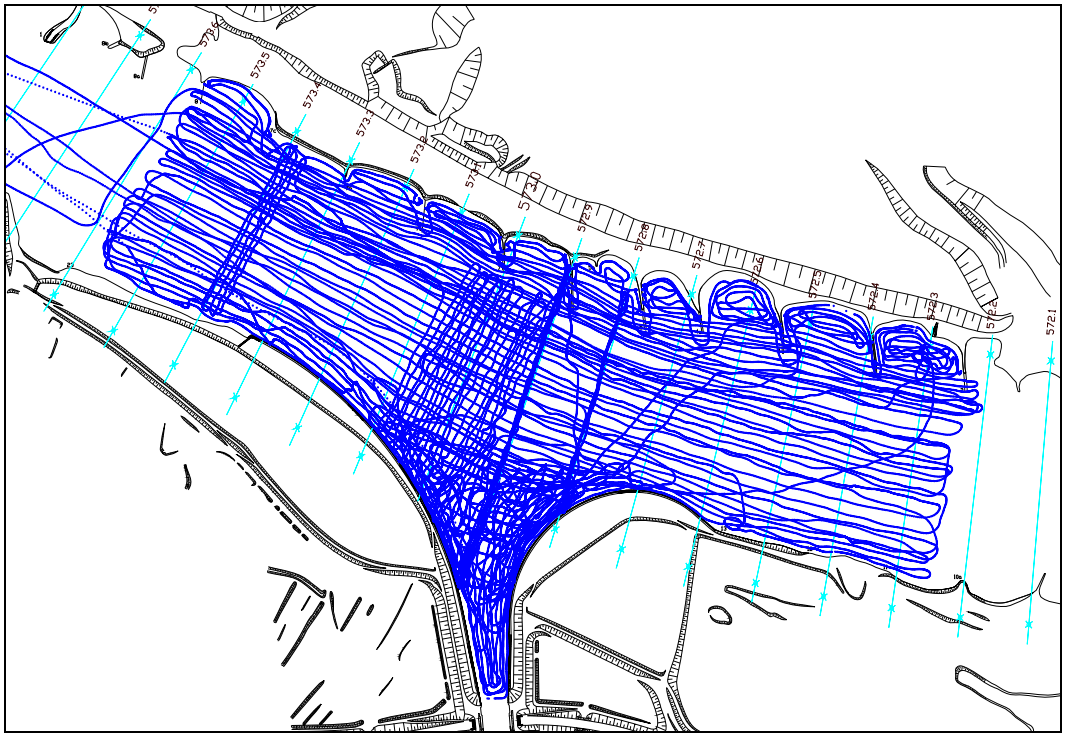


Abb. 2: Darstellung der Fahrspur einer flächigen Geschwindigkeitsaufnahme in der Elbe im Bereich der Mündung des Elbe-Seiten-Kanals (ESK)

In Abb. 2 ist die Fahrspur einer Messung dargestellt, die durch die Bundesanstalt für Wasserbau beauftragt wurde. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden als Rasteraufnahme durchgeführt und es wurden drei Querprofilmessungen durchgeführt. Im direkten Mündungsbereich des ESK wurde das Aufnahmeraster verdichtet. Um den Einfluss der Buhnefelder am nördlichen Ufer zu beurteilen, wurden hier ebenfalls die Geschwindigkeiten flächig aufgenommen. Zeitgleich zu den Geschwindigkeitsaufnahmen wurden die Sohlenhöhen gepeilt.

4 Auswertung

Die Positionierung der Fließgeschwindigkeiten erfolgt über die zeitgleich durchgeführte DGPS-Messung. Die Koordinaten der DGPS-Messungen werden den Ensembles der ADCP-Messungen über den Zeitkanal zugewiesen. Bei der Verknüpfung erhält jede Tiefenzelle eine Lage- und Höhenkoordinate im entsprechenden Bezugssystem.

Einzelne Messwerte einer ADCP-Messung stellen immer eine zeitlich hochaufgelöste Momentaufnahme dar, die aufgrund von Turbulenzen eine relativ hohe Streubreite aufweisen. Um ein repräsentatives Strömungsbild wiederzugeben, werden die einzelnen Messwerte zu einem gemittelten Ergebnis zusammengefasst. Durch die Mittelung örtlich naheliegender Messwerte nähern sich die einzelnen Ensembles einem resultierenden mittleren Geschwindigkeitsprofil an.

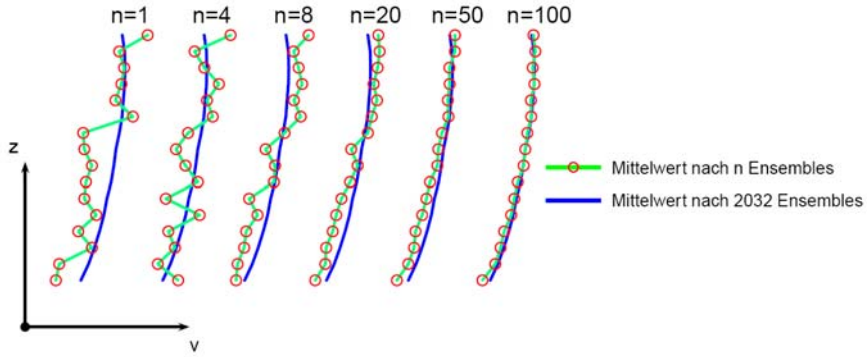


Abb. 3: Schematische Darstellung zur Bildung eines lotrechten mittleren Geschwindigkeitsprofils unter Einbeziehung einer größer werdenden Anzahl einzelner Ensembles. Dargestellt sind die Fließgeschwindigkeiten (v) über dem Abstand zur Sohle (z)

In Abb. 3 sind die Ergebnisse einer punktuellen Geschwindigkeitsaufnahme schematisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich mit größer werdender Anzahl der Ensembles das mittlere Geschwindigkeitsprofil einer stetigen Funktion annähert. Als Referenz wurde ein mittleres Geschwindigkeitsprofil, welches sich aus über 2000 Ensembles berechnete, in die Darstellung übernommen.

Bei der Mittelung werden örtlich naheliegende Ensembles zusammengefasst. Die Mittelung erfolgt entsprechend der Durchführung entweder als Profilmittelung oder als flächige Mittelung. Bei der Profilmittelung wird das Profil in Segmente eingeteilt und alle Ensembles eines Segmentes zusammengefasst. Bei einer flächigen Mittelung wird ein quadratisches Raster erzeugt und alle Ensembles innerhalb eines Gitterelementes gemittelt (siehe Abb. 4).

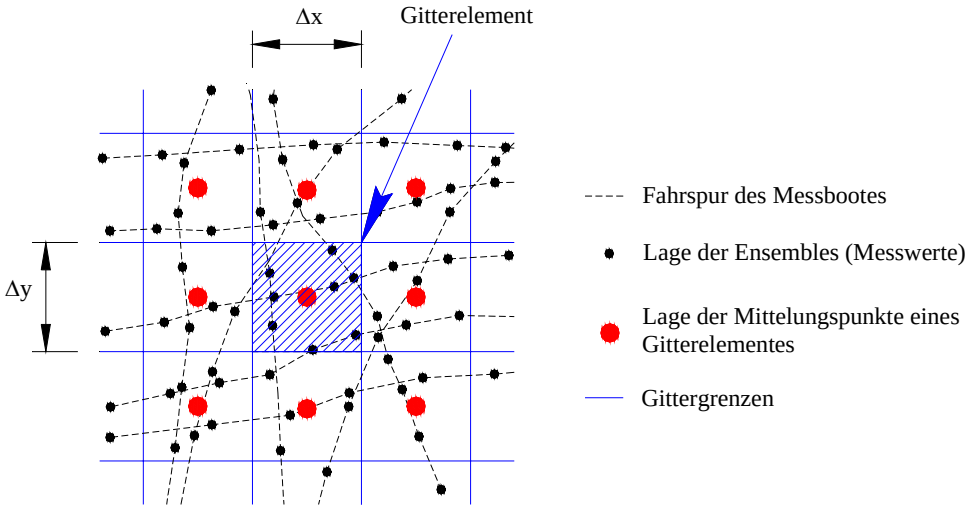


Abb. 4: Bestimmung einer gemittelten Geschwindigkeitsverteilung aus einer flächigen Geschwindigkeitsaufnahme

Die Mittelwertbildung der Ensembles innerhalb eines Segmentes / Gitterelementes wird wie folgt durchgeführt (siehe Abb. 5):

> Bestimmung einer gemittelten Sohlen- und Wasserspiegelhöhe
> Einteilung des Mittelungssegmentes in Tiefenzellen
> Einführung einer Sohlenabstandskoordinate z_i für jeden Messwert
> Projektion der Messwerte auf die gemittelten Sohlenhöhe
> arithmetische Mittelwertbildung aller Messwerte innerhalb einer Tiefenzelle

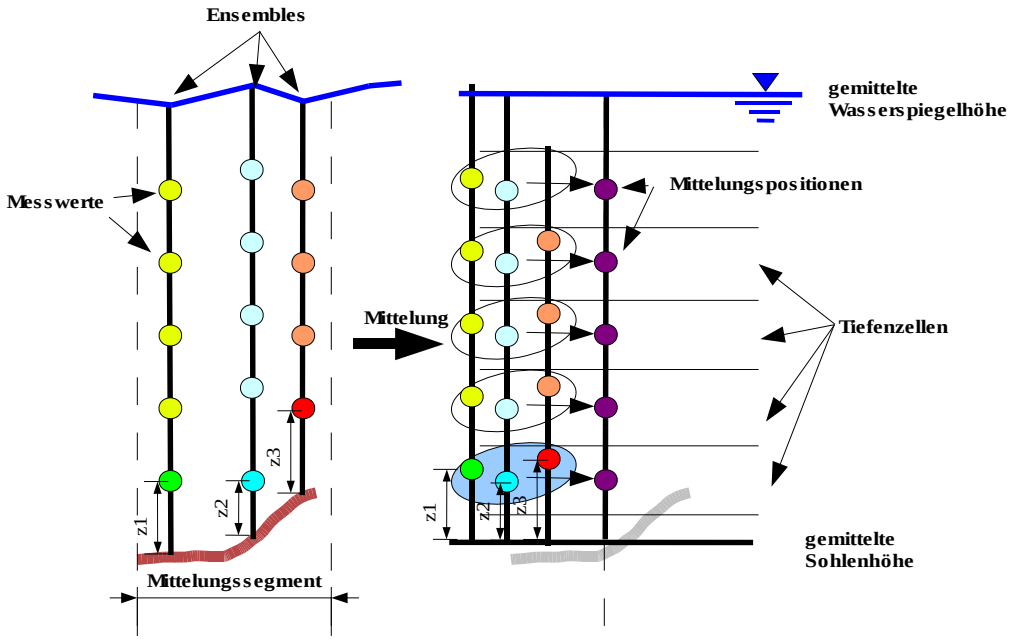


Abb. 5: Schematische Darstellung der Mittelwertbildung innerhalb eines Segmentes

Nach der Mittelwertbildung erfolgt eine Extrapolation der Randbereiche mit einem geeigneten Verfahren (SCHMID & NIESLER 2005).

5 Praktische Beispiele

5.1 Main-Eibelstadt

Im Rahmen des Main-Ausbaus wurde als Ausgleichsmaßnahme die Buhnenfeldkette zwischen Main-km 263,60 und Main-km 264,00 durch das Wasserstraßen-Neubauamt Aschaffenburg umgestaltet. Als Grundlage für weitere Planungen sollte in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau ein Nachweis der Veränderungen anhand von Naturmessungen erfolgen. Hierzu wurde das Ingenieurbüro Schmid durch die Bundesanstalt für Wasserbau beauftragt, vor und nach dem Umbau die Fließgeschwindigkeiten und die Sohllagen bei jeweils zwei Abflüssen (MW und HSW) im Hauptstrom und in den Buhnenfeldern zu ermitteln. Die Messungen erfolgten in den Jahren 2002 und 2006. Zur Erhöhung der Datendichte wurden die Naturuntersuchungen als eng angeordnete Querprofilmessungen durchgeführt (8 Profile mit jeweils 6 Messfahrten pro Profilmessung).

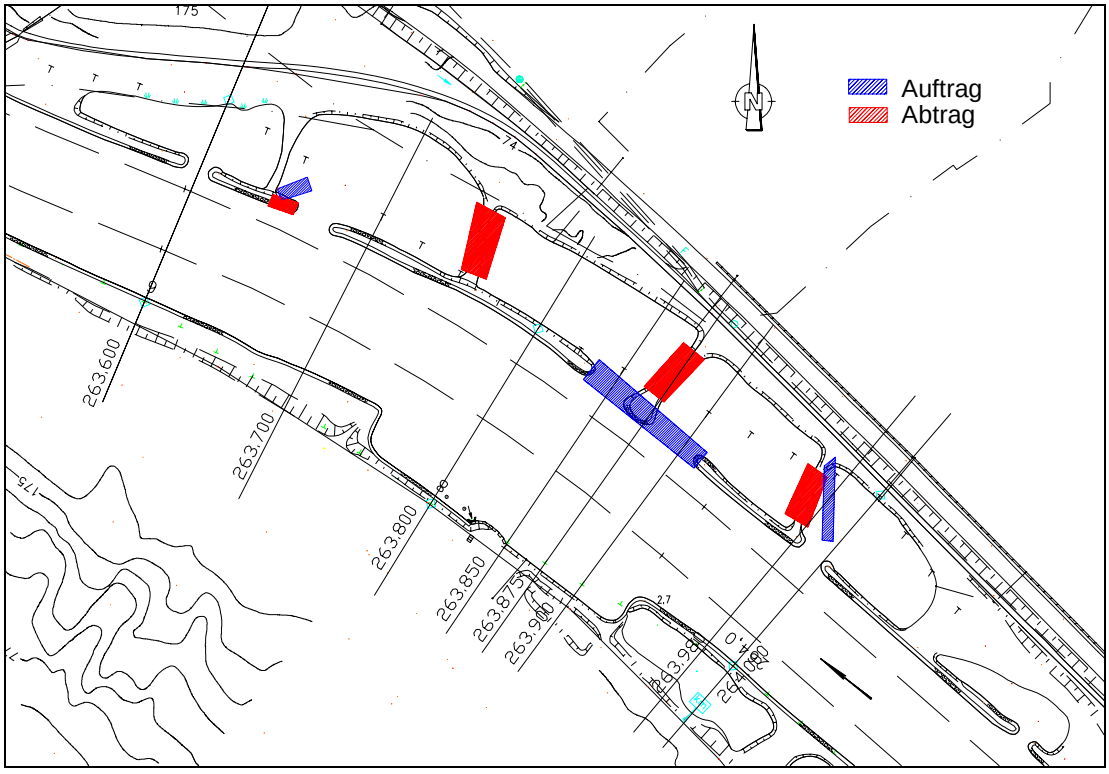


Abb. 6: Lageplan der Untersuchungsstrecke im Main bei Eibelstadt mit Darstellung der Querprofile und Skizzierung der Umbaumaßnahmen und einem Auszug aus der DBWK

Die Umbaumaßnahmen der Untersuchungsstrecke sind in Abb. 6 skizziert. Zeitgleich zur Umgestaltung der Buhnenfeldkette erfolgte durch Baggerungen eine Vertiefung der Fahrrinne.

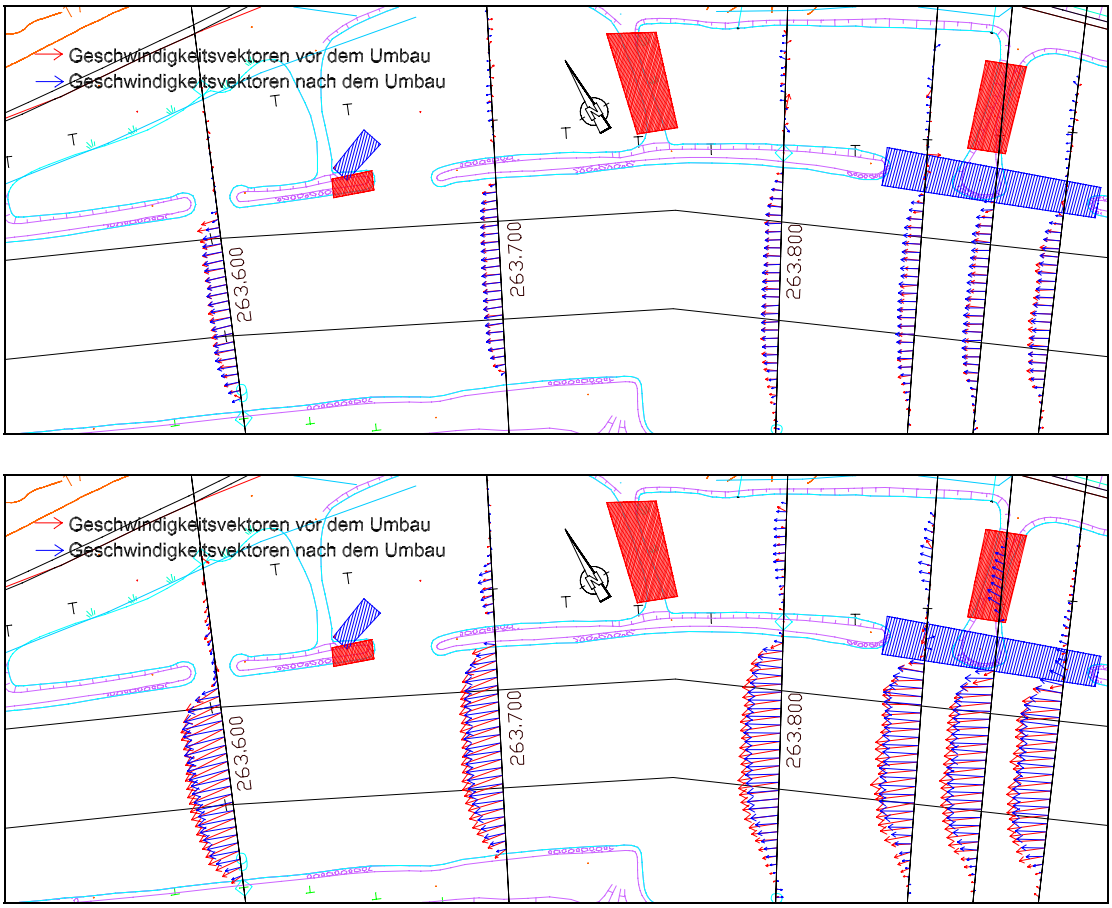


Abb. 7: Darstellung der tiefengemittelten Geschwindigkeitsvektoren der Messkampagnen am Main bei Eibelstadt; oben: Ausschnitt der Messungen bei MW; unten: Ausschnitt der Messungen bei HSW

In Abb. 7 ist ein Ausschnitt der Ergebnisse der Messkampagnen dargestellt. Es sind die tiefengemittelten Geschwindigkeitsvektoren vor dem Umbau (rot) und nach dem Umbau (blau) eingezeichnet. Betrag und Richtung der Geschwindigkeitsinformationen geben wichtige Hinweise zum Verständnis der Strömungsvorgänge.
Des Weiteren können aus den Profilmessungen z. B. Durchflussverteilungen getrennt nach Hauptgerinne / Buhnenfeld bestimmt und zur Beurteilung herangezogen werden.

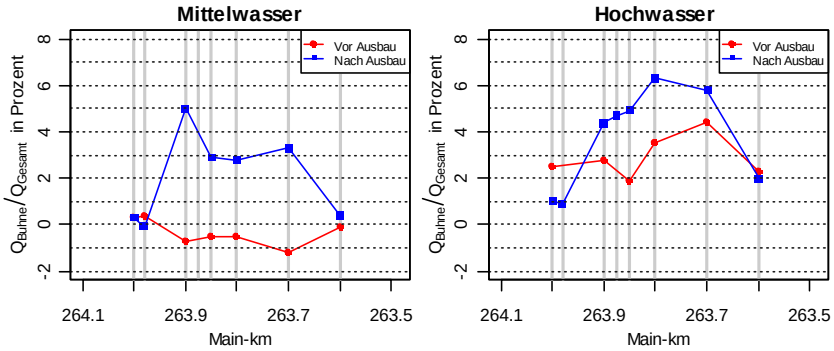


Abb. 8: Darstellung des prozentualen Anteils des Buhnenfelddurchflusses vom Gesamtdurchfluss; links Messungen bei MW, rechts Messungen bei HSW

5.2 Elbe-Schönberg

Das Wasser- und Schifffahrtsamt Magdeburg beauftragte die Bundesanstalten für Wasserbau und Gewässerkunde (BAW/BfG) mit der Entwicklung neuer Buhnenformen. Zusätzlich zur hydraulischen Wirksamkeit wurde eine erhöhte morphologische Dynamik im Buhnenfeld zur Verbesserung ökologischer Funktionen gefordert. Aus verschiedenen Untersuchungen wurden zwei Buhnenformen abgeleitet (HENNING & HENTSCHEL 2006):

1. Kerbbuhnen, bei denen bereits vorhandene Buhnendurchrisse durch die Anlage von definierten „Kerben“ im Buhnenrücken befestigt werden
2. Knickbuhnen als Kombination einer inklinanten und deklinanten Buhnenbauweise

Im Rahmen einer langjährigen Betrachtung wurde das Ingenieurbüro Schmid durch die Bundesanstalt für Wasserbau beauftragt, großflächige Geschwindigkeitsaufnahmen und Sohlenpeilungen in ausgewählten Buhnenfeldern in der Elbe bei Schönberg durchzuführen. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über 8 Buhnenfelder der unteren Mittelelbe zwischen Elbe-km 440 und Elbe-km 444. Die Buhnen im Untersuchungsgebiet wurden als Kerbbuhnen, Knickbuhnen (Abb. 9) und Standardbuhnen umgebaut bzw. rekonstruiert. Seit 2001 wurden 9 Messkampagnen durch das Ingenieurbüro Schmid bei unterschiedlichen Wasserständen zwischen MNQ und MHQ durchgeführt.

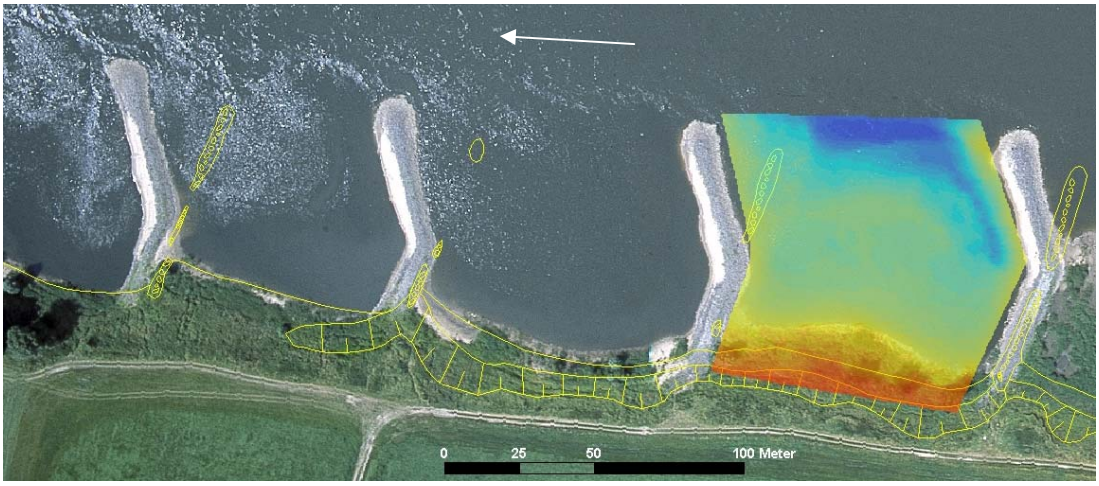


Abb. 9: Luftbild der Knickbuhnengruppe mit Ausschnitt aus der DBWK und Darstellung der Sohlenhöhen eines Buhnenfeldes; entnommen aus (HENNING & HENTSCHEL 2006)

Die Ergebnisse der Messkampagnen werden anhand von zwei Buhnenfeldern mit Kerbbuhnen einer Messkampagne vom Mai 2006 bei MHQ vorgestellt. Während dieser Messkampagne waren die Buhnenrücken vollkommen überströmt und konnten mit dem Messboot befahren werden.

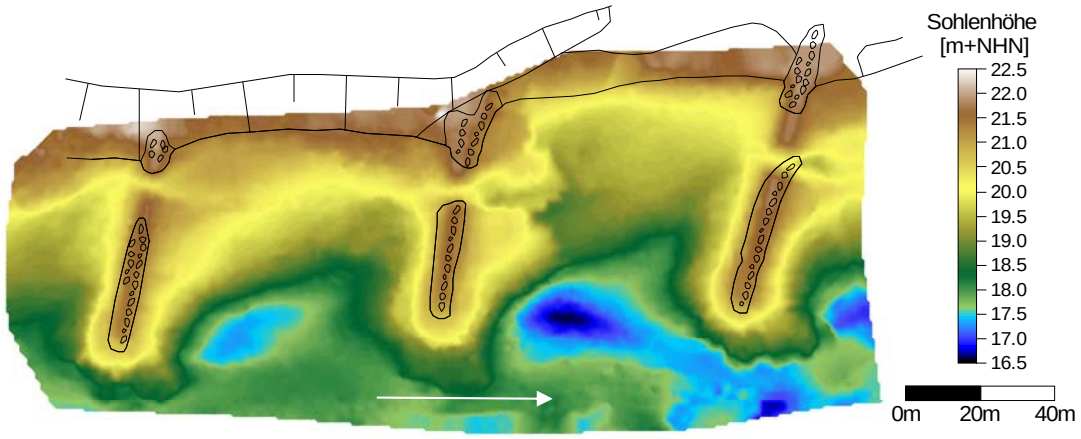


Abb. 10: Darstellung der Sohltopografie in den Buhnenfeldern 304 und 305 in der Elbe bei Schönberg mit einem Auszug aus der DBWK

In Abb. 10 sind die Ergebnisse der Sohlenpeilungen in zwei Buhnenfeldern mit Kerbbuhnen dargestellt. Die Buhnenfelder befinden sich bei Elbe-km 443,5 auf der linken Uferseite. Zu erkennen sind die Durchrisse im uferseitigen Drittel der Buhnen und zwei Kolke unterhalb der Buhnenköpfe.

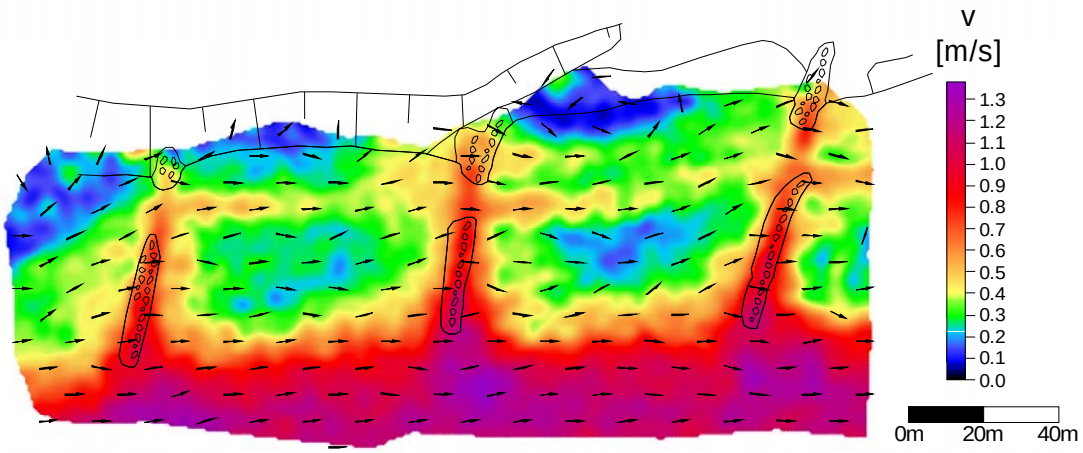


Abb. 11: Darstellung der Fließgeschwindigkeiten in den Buhnenfeldern 304 und 305 in der Elbe bei Schönberg mit einem Auszug aus der DBWK. Es sind die Geschwindigkeitsvektoren und farblich kodiert der Betrag der tiefengemittelten Geschwindigkeiten eingezeichnet.

In Abb. 11 sind die tiefengemittelten Geschwindigkeiten der Buhnenfelder dargestellt. Zu erkennen sind die größeren Fließgeschwindigkeiten im Bereich der Buhnendurchrisse, die sich weit in die Buhnenfelder fortsetzten.

Durch die langjährige Betrachtung flächiger Geschwindigkeiten und Sohlentopografien bei verschiedenen Wasserständen können Veränderungen aufgedeckt und ausgehend von den unterschiedlichen Buhnenformen Hinweise auf die morphologische Dynamik abgeleitet werden.

5.3 Elbe-Mündung ESK

In der Elbe im Mündungsbereich des Elbe-Seiten-Kanal (ESK) kommt es regelmäßig zu Anlandungen, die durch Baggerungen beseitigt werden müssen. Zum Verständnis der Strömungsvorgänge wurde das Ingenieurbüro Schmid durch die Bundesanstalt für Wasserbau mit einer großflächigen Geschwindigkeitsaufnahme und begleitenden Sohlenpeilungen im Mündungsbereich beauftragt.

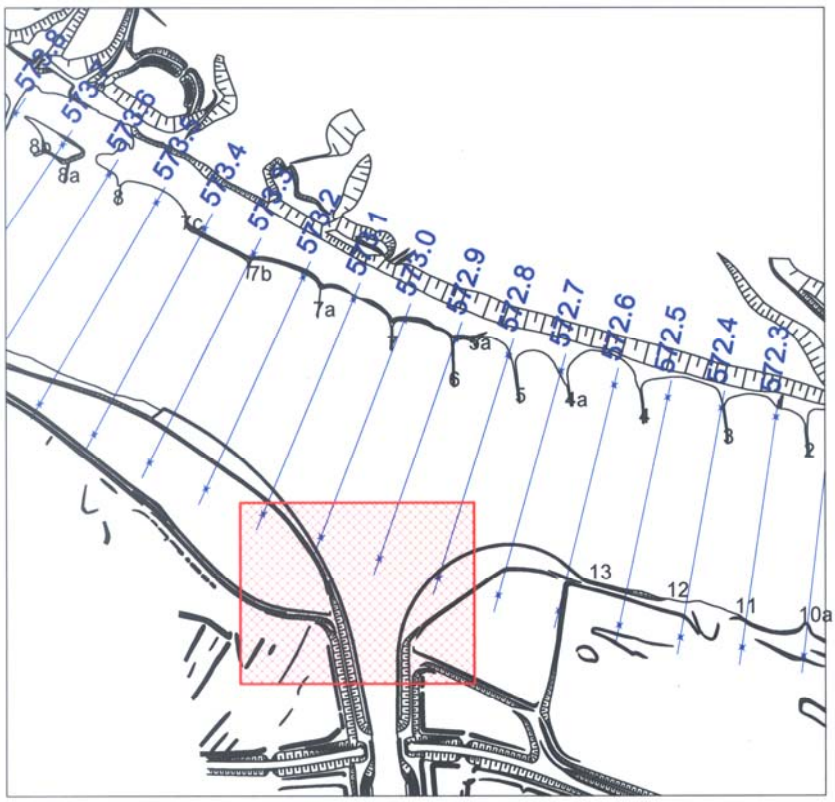


Abb. 12: Lageplan der Untersuchungsstrecke in der Elbe im Mündungsbereich des ESK mit Ausschnitt aus der DBWK

In Abb. 12 ist der Lageplan der Untersuchungsstrecke dargestellt. Die Messungen erfolgten über die gesamte Flussbreite der Elbe und im Mündungsbereich des ESK. Die Fahrspur des Messbootes während der Aufnahme wurde bereits in Abb. 2 gezeigt. In Abb. 12 rot skizziert ist ein Ausschnitt des Untersuchungsbereichs, der in den Abb. 13 und Abb. 14 dargestellt ist.

In Abb. 13 ist ein Ausschnitt der ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Zu erkennen ist ein ausgedehntes Wirbelsystem mit zwei Wirbeln im direkten Mündungsbereich des ESK.

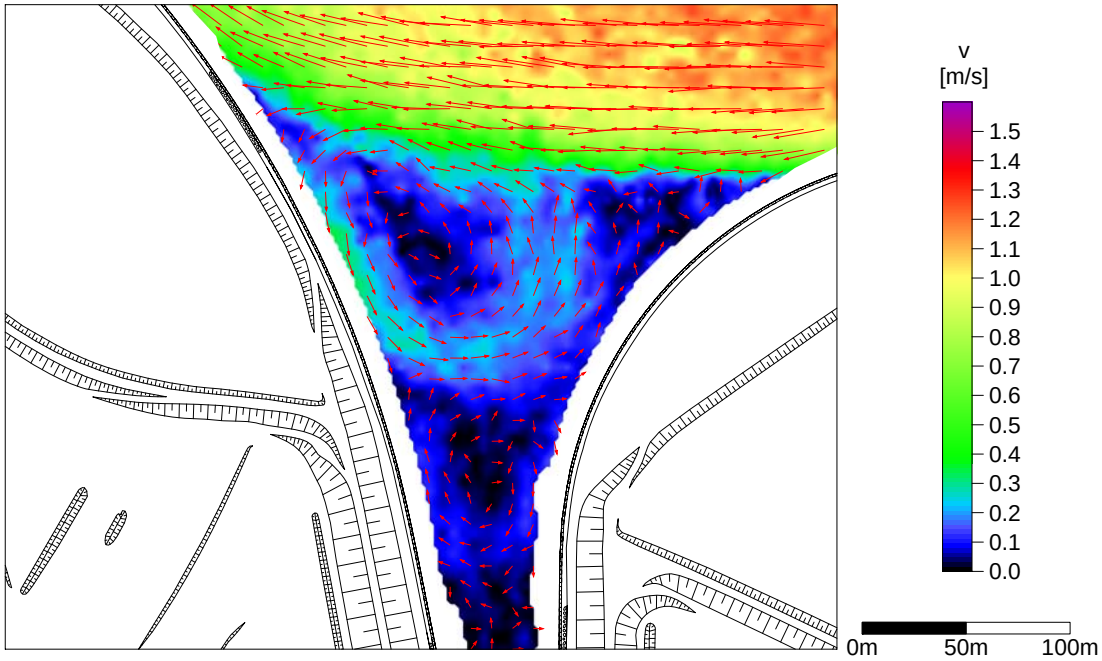


Abb. 13: Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Mündungsbereich des ESK. Es sind die Geschwindigkeitsvektoren und farblich kodiert der Betrag der tiefengemittelten Geschwindigkeiten in einem Ausschnitt der DBWK eingezeichnet

In Abb. 14 sind die Ergebnisse der zeitgleich durchgeführten Sohlenpeilungen dargestellt. Aufgrund der deutlichen tieferen Sohlenhöhe entlang der Fahrrinne in den ESK wird vermutet, dass kurz vor den Messungen Baggerungen durchgeführt wurden.

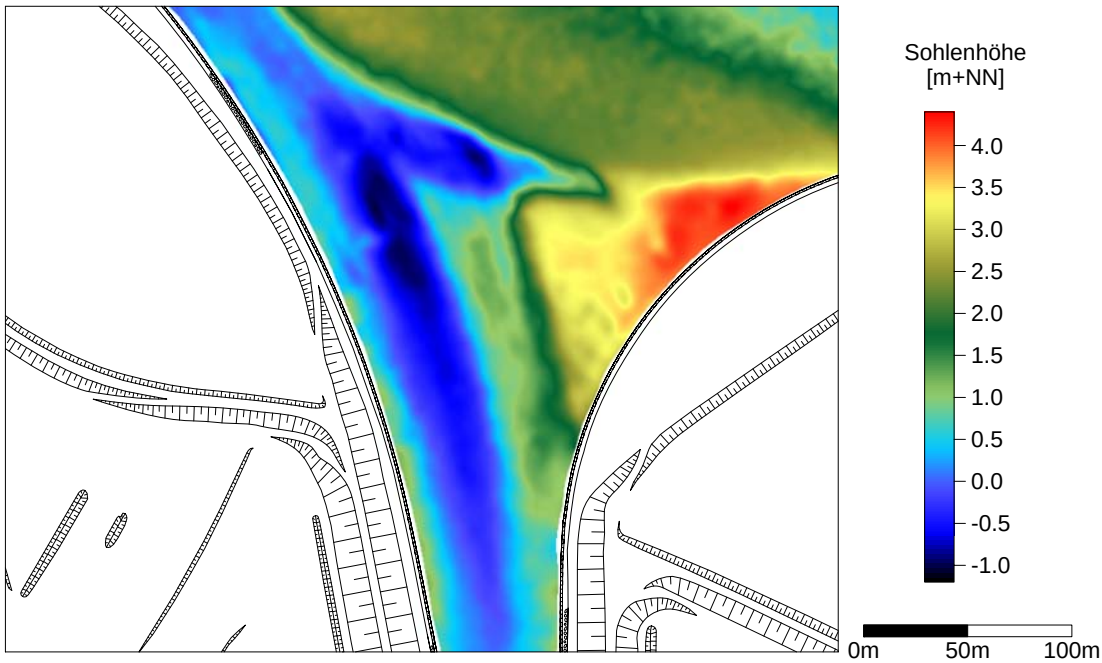


Abb. 14: Darstellung der Sohltopografie im Mündungsbereich des ESK mit Ausschnitt aus der DBWK

6 Schlussbetrachtung

Die großflächige Erfassung 3-dimensionaler Geschwindigkeitsvektoren in kurzer Zeit gibt wichtige Hinweise zum Systemverständnis großskaliger Strömungsvorgänge. Sie dient zur Beurteilung wasserbaulicher Maßnahmen und trägt zum Verständnis der Wechselwirkung zwischen hydraulischen und morphologischen Prozessen bei. Ein weiterer wichtiger Aspekt sind umfangreiche Monitoringkampagnen, wodurch langzeitliche Veränderungen aufgedeckt werden können. Schließlich dienen großflächige Geschwindigkeitsaufnahmen auch zur Kalibrierung und Validierung von hydrodynamisch-numerischen und gegenständlichen Modellen.

Literatur

ADLER, M.: ADCP-Messungen an Bundeswasserstraßen, Akustische Doppler Geräte in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik, Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz, Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 12.05, Koblenz, 2005

HENNING, M. & HENTSCHEL, B.: Morphodynamik in Buhnenfeldern - Naturuntersuchungen an der Elbe, Wasserbaukolloquium 2006: Strömungssimulation im Wasserbau, Dresdener Wasserbauliche Mitteilungen Heft 32, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden, Dresden, 2006

ORLOVIUS, A. & HENNING, M.: Auswertungen von ADCP Daten zur Kalibrierung von Strömungsmodellen - Anforderungen und Randbedingungen, Akustische Doppler Geräte in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik, Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz, Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 12.05, Koblenz, 2005

SCHMID, R. & NIESLER, H.: Praktischer Einsatz des ADCP – von der punktuellen bis zur großflächigen Geschwindigkeitsaufnahme, Akustische Doppler Geräte in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik, Beiträge zum Seminar am 28./29. September 2005 in Koblenz, Forum für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Heft 12.05, Koblenz, 2005

SIMPSON, M. R.: Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, Open File Report 01-1, United States Geological Survey, Sacramento, CA USA, 2001, URL `http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr0101/`

Kontakt:

Dipl.-Ing. Roland Schmid
Ingenieurbüro Schmid
Hundsgasse 6
76889 Kapsweyer
Tel.: 06340/ 5929
Fax: 06340/ 5927
info@schmid-ib.de

Dipl.-Ing. Harald Niesler
Ingenieurbüro Schmid
Hundsgasse 6
76889 Kapsweyer
Tel.: 06340/ 5929
Fax: 06340/ 5927
info@schmid-ib.de

ADCP-Messungen an einem voralpinen Gewässer mit erheblichem Schwebstoff- und Geschiebetransport

Katharina Fiedler

1 Einleitung

Die ADCP-Technik hat sich im Bereich der Abflussmessung während der letzten Jahre zu einer vielversprechenden Alternative zu herkömmlichen Methoden, wie z. B. Flügelmessungen, entwickelt. Die Auswertung von ADCP-Messungen nach der Pegelvorschrift gilt unter „normalen“ Randbedingungen (kein Geschiebetrieb, nur mäßige Schwebstoffkonzentrationen und gleichmäßige Strömung ohne allzu große Turbulenzen) mittlerweile als ausgereift und liefert schnell und komfortabel die gewünschten Ergebnisse.
Herrschen jedoch Geschiebetrieb, hohe Schwebstoffkonzentrationen und turbulente Strömungsverhältnisse im Messquerschnitt, wie das bei Hochwasser oft der Fall ist, so sinken Qualität und Quantität der Messergebnisse. Das Trägerboot liegt nicht mehr so ruhig im Wasser, Luftblasen werden verstärkt unter dem ADCP hindurchtransportiert und stören die Messung und Treibgut gefährdet das Trägerboot samt allen darauf befestigten Messeinrichtungen. Für viele Fragestellungen sind aber gerade Strömungsmessungen während Hochwasser von besonderem Interesse. Hier sind umfangreiche Auswerteroutinen im Nachgang der Messung erforderlich, um bei derart ungünstigen Messbedingungen verwertbare Ergebnisse zu erhalten.
Aber auch die weiterführende Auswertung der aufgezeichneten Messwerte zur Abschätzung morphologischer Strömungsparameter, wie beispielsweise Geschiebetrieb oder Schwebstoffkonzentrationen, verlangt eine umfangreiche Datennachbearbeitung und in vielen Fällen zusätzliche Messungen mit konventionellen Methoden zur Eichung der ADCP-Daten.
Aus diesem Grund wurden der Lehrstuhl und die Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) beauftragt, die Einsatzmöglichkeiten der ADCP-Technik unter hochwasserähnlichen Abflussbedingungen zu testen. Während der letzten zwei Jahre wurden methodische Untersuchungen und Naturmessungen zur Beantwortung folgender grundsätzlicher Fragestellungen durchgeführt.

> Wo liegen die Einsatzgrenzen der ADCP-Technik im Hinblick auf die praktische Durchführbarkeit der Messungen (Sicherheitsaspekte), im Hinblick auf die notwendige Mindestmenge an erfassten Daten zur Abflussbestimmung und im Hinblick auf die Notwendigkeit zusätzlicher Messungen zur Ergänzung der ADCP-Daten?

> Inwieweit besteht die Möglichkeit, anhand von ADCP-Messungen morphologische Prozesse wie Geschiebebewegungen und Schwebstofftransport abzuschätzen? Sind hier nur qualitative oder auch quantitative Aussagen möglich und benötigt man dafür zusätzlich zu den ADCP-Daten noch andere Messungen?

Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten ADCP-Messungen an einem voralpinen Gewässer in Bayern, beschreibt die dabei aufgetretenen Probleme und Herausforderungen und zeigt mögliche Lösungswege auf.

2 Situation an der Messstelle

Die Tiroler Achen ist ein sommerkaltes, alpines Gewässer, das durch eine starke Abflussdynamik und hohe Schwebstofftransportraten charakterisiert wird. Sie ist der bedeutendste Zufluss in den Chiemsee (Abb. 1) und trägt mit ihren hohen Schwebstofffrachten unter anderem maßgeblich zur Verlandung des Mündungsdeltas bei.

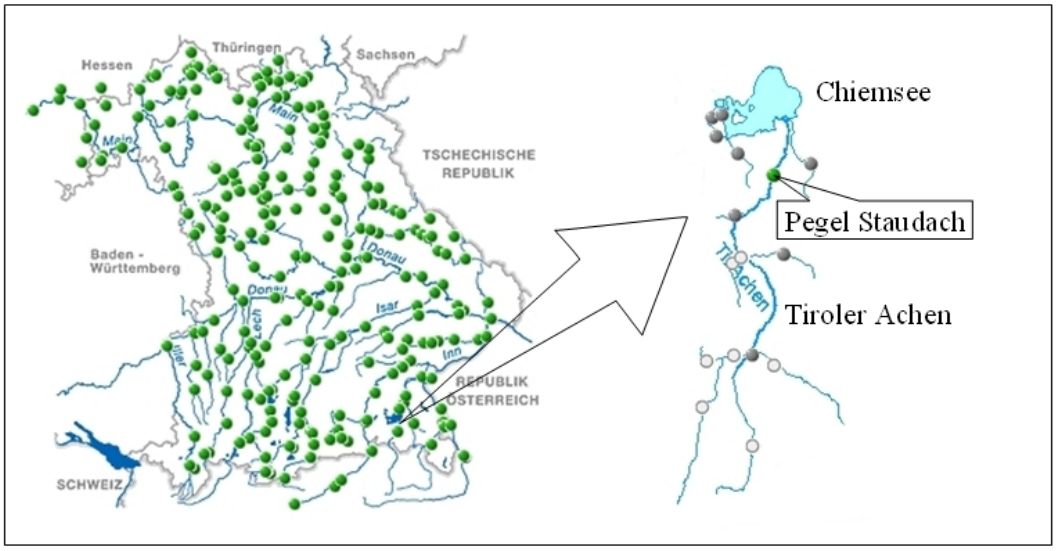


Abb. 1: Lage des Pegels Staudach an der Tiroler Achen (www.hnd.bayern.de)

Bei Flusskilometer 9,23 befindet sich der vom Wasserwirtschaftsamt Traunstein betriebene Pegel Staudach (Abb. 2). Der mittlere Abfluss MQ liegt in diesem Bereich bei 35 m³/s, das HQ_5 bei 440 m³/s und das HQ_{100} beträgt 870 m³/s (www.hnd.bayern.de).

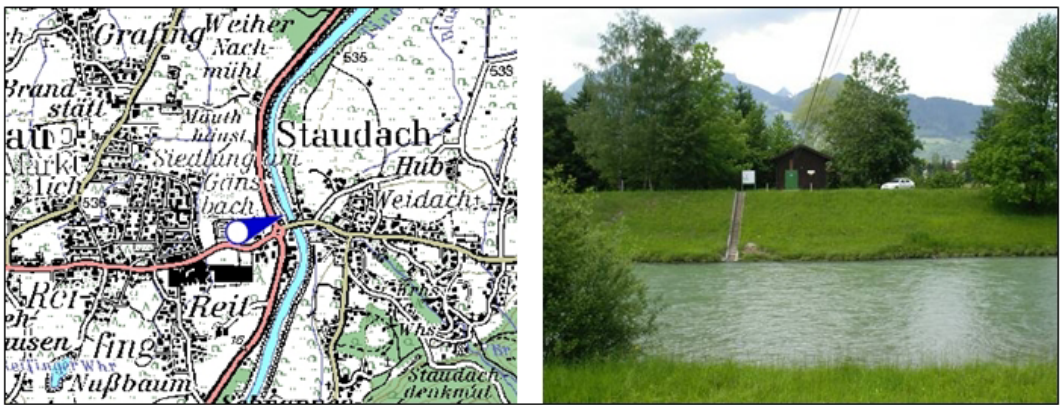


Abb. 2: Lageplan des Pegels Staudach (www.hnd.bayern.de), Foto vom Pegelquerschnitt

3 ADCP-Messungen

In den Jahren 2006 und 2007 wurden am Pegel Staudach mehrere ADCP-Messungen bei unterschiedlichen Abflusssituationen durchgeführt. Bei der Auswertung der Daten wurde verstärktes Augenmerk auf die Messungen während hochwasserähnlicher Situationen gelegt, bei denen die Messergebnisse durch folgende Randbedingungen beeinträchtigt wurden:

> starker Geschiebetransport im Pegelquerschnitt
> hohe Schwebstoffkonzentrationen

3.1 Verwendete Messgeräte

Die Messungen wurden mit einem *Workhorse Rio Grande* von *RD Instruments* (1200 kHz) des Wasserwirtschaftsamtes Landshut durchgeführt. Als Trägergerät kam der Trimaran *Riverboat* von *OceanScience* zum Einsatz. Das Boot wurde mit Hilfe der am Pegel installierten Seilkrananlage über das Gewässer gezogen. Um eine zu starke Schrägstellung des Zugseils zu vermeiden, wurde der am Pegel vorhandene hydrometrische Flügel knapp über der Wasseroberfläche über den Querschnitt bewegt, an ihm war mit einem einige Meter langen Seil das Trägerboot des ADCP befestigt.

Die aus den Wasserstandsmessungen und der am Pegel gültigen Wasserstands-Abfluss-Beziehung berechneten Abflüsse wurden zur Qualitätskontrolle der Ergebnisse der ADCP-Messungen verwendet. Bei manchen Messeinsätzen konnte die Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt vor der ADCP-Messung mit Flügelmessungen erfasst werden. Diese zusätzlichen Messungen waren jedoch aufgrund des erheblichen Zeitaufwandes nicht vor jedem ADCP-Einsatz möglich. Im Vorlauf einer ADCP-Messung konnten einige Meter oberhalb des Messquerschnitts auch Schwebstoffproben entnommen werden.

Abb. 3: Erfassung des zurückgelegten Messweges mit einer Totalstation

Zur Erfassung des zurückgelegten Messweges während der ADCP-Fahrten wurde auf dem Trägerboot ein 360°-Prisma befestigt. Eine Totalstation verfolgte vom Ufer aus das Prisma (Abb. 3) und speicherte die Lageinformationen im Sekundentakt ab.

3.2 ADCP-Abflussmessungen

Insgesamt konnten an der Tiroler Achen in den Jahren 2006 und 2007 drei Abflussereignisse im Bereich zwischen 150 und 200 m³/s messtechnisch erfasst werden. Die mittleren Fließgeschwindigkeiten lagen dabei im Bereich von 2,2 bis 2,5 m/s mit Spitzen bis zu 4 m/s. Bei einer Wasserspiegelbreite von 35 bis 40 m betrug die mittlere Fließtiefe während der Messungen ca. 2 m. Die folgenden Ausführungen haben die Auswertung des Messeinsatzes am 08. August 2006 zum Inhalt. Anhand dieses Beispiels sollen die Auswirkungen der Strömungsverhältnisse im Messquerschnitt auf die ADCP-Messungen sowie die Vorgehensweise bei der Bearbeitung der Messwerte beschrieben werden.

Während der fünf Flussquerungen des ADCP, die in Summe zirka 15 Minuten dauerten, lag der aus den Pegeldaten ermittelte Abfluss im Messquerschnitt ziemlich konstant bei 144 m³/s. Vor dem ADCP-Einsatz durchgeführte Flügelmessungen an sieben Punkten im Querschnitt ergaben Fließgeschwindigkeiten zwischen 2,0 und 2,8 m/s (Abb. 4).

Wertet man die ADCP-Messungen mit Referenz *Bottom Track* (BT) aus, so erhält man einen Abfluss von 128 m³/s. Auch die Fließgeschwindigkeiten stimmen vor allem im linken Querschnittsbereich nicht mit den Ergebnissen der Flügelmessungen überein. Der Grund für die Unterschätzung ist in Abb. 4 dargestellt.

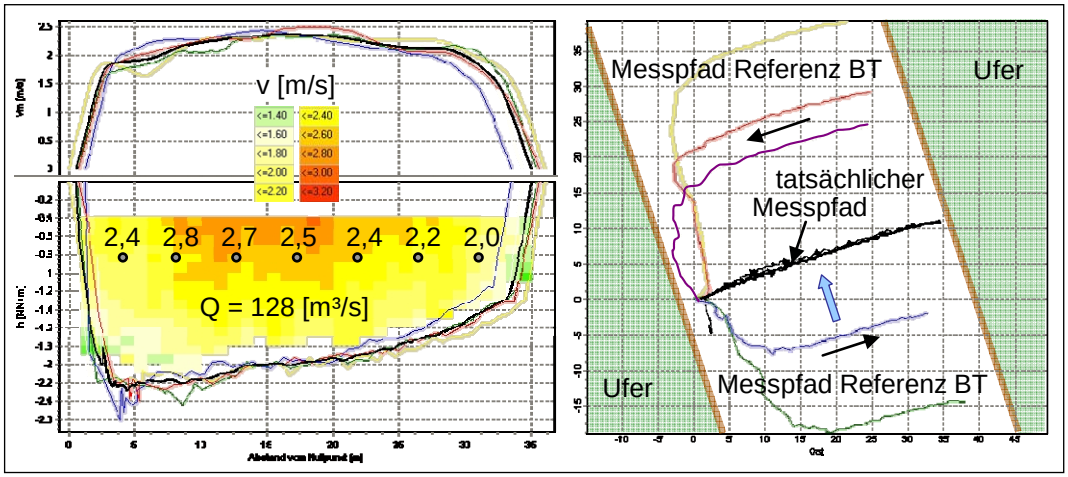


Abb. 4: Mittlere Fließgeschwindigkeitsverteilung im Messquerschnitt (links), tatsächlicher und mit Referenz BT ermittelte Messpfade (rechts)

Unter Ausnutzung des Doppler Effekts kann der ADCP nur die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Partikeln im Wasser und sich selbst ermitteln. Um daraus absolute Fließgeschwindigkeiten zu berechnen, benötigt er zusätzliche Informationen über seine Eigenbewegung, die er durch Auswertung des geräteinternen Kompasses und des BT-Signals erhält. Bei der Abtastung der Sohle wird jedoch vorausgesetzt, dass sich diese in Ruhe befindet und die erfasste Relativbewegung einzig und allein aus der Eigenbewegung des ADCP resultiert. Ist

dies nicht der Fall, so interpretiert der ADCP die Bewegung des Sohlmaterials als Eigenbewegung stromaufwärts (Abb. 4). Wird knapp oberhalb der Sohle eine Schicht mit sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen unter dem ADCP hindurch transportiert, die vom ADCP fälschlicher Weise als Sohle identifiziert wird, führt auch dieses Phänomen zu einer Fehlinterpretation der Situation und zu der Annahme einer unrealistischen Eigenbewegung stromaufwärts.

Nachdem der ermittelte Messpfad Eingang in die Berechnung der absoluten Fließgeschwindigkeiten findet, werden diese aufgrund des Fehlers unterschätzt (Abb. 5). Das führt in weiterer Folge auch zu einer Unterschätzung des Abflusses im Querschnitt.

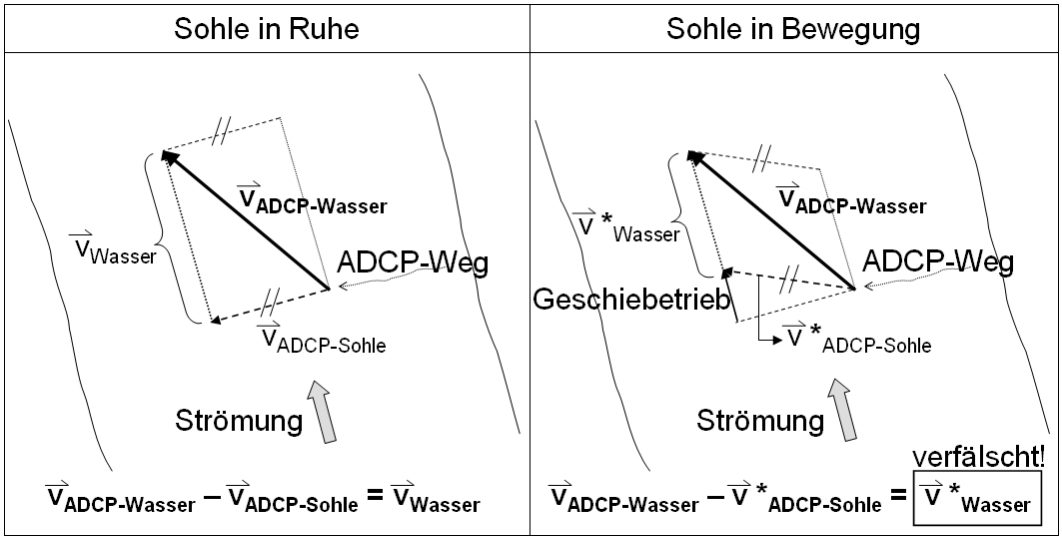


Abb. 5: Einfluss des Geschiebetriebs auf die Berechnung der absoluten Fließgeschwindigkeiten (v_{Wasser}) mit Referenz BT

Wie Abb. 4 zeigt, wurde der Messpfad im gegenständlichen Fall vor allem im linken Bereich des Querschnitts durch Sedimentbewegungen an oder nahe der Sohle stark verfälscht. Aus diesem Grund war es notwendig, den zurückgelegten Messpfad des ADCP mit externen Messinstrumenten aufzuzeichnen.

3.2.1 Möglichkeiten der Fehlerkompensation bei Geschiebetrieb

Normalerweise wird unter derartigen Messbedingungen auf die mittlerweile weit verbreitete dGPS-Technik zur korrekten Erfassung des ADCP-Messwegs zurückgegriffen. Die Software *WinRiver* bietet für diesen Fall die Möglichkeit, die zusätzlichen Informationen direkt in die ADCP-Datensätze zu integrieren. GPS-Messungen sind jedoch nicht an jedem Standort durchführbar. Ungünstige Witterungsverhältnisse, enge Täler, hohe Bauwerke oder dichter Bewuchs der Ufer können den für die Messung notwendigen Kontakt zu den GPS-Satelliten unterbrechen. In einem derartigen Fall ist man normaler Weise auf die *Bottom Track* Daten des ADCP angewiesen. Auch hier stehen mittlerweile verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, wie der durch den Geschiebetrieb verursachte Längsversatz der Gewässerquerungen kompensiert werden kann. Der einfachste Ansatz, der dann angewendet werden kann, wenn die Strömungsverhältnisse über die gesamte Messlänge annähernd gleich sind, ist bereits in der aktuellen Version von *AGILA* implementiert (ADLER 2007). Anhand einer Schleifenfahrt werden der aufgrund Geschiebetriebs verbleibende Längsversatz und der daraus resultierende

Fehler im Abfluss beziehungsweise in den Fließgeschwindigkeiten ermittelt. Das Ergebnis kann dann bei der Berechnung des Gesamtabflusses im Querschnitt berücksichtigt werden. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass das Ausmaß der Verfälschung des Messpfads in etwa gleichmäßig über die Gewässerbreite verteilt ist. Ist dies – beispielsweise bei gegliederten Querschnitten – nicht der Fall, schafft ein von RD Instruments entwickeltes Tool Abhilfe (MUELLER 2007). Auch hierfür ist eine Schleifenfahrt notwendig. Allerdings wird in diesem Fall der aus dem Längsversatz ermittelte Fehler in der Abflussberechnung nicht gleichmäßig über den Messweg verteilt, sondern anhand der jeweiligen Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Ensembles gewichtet. Dieses Tool verspricht aufgrund der besseren Berücksichtigung von unterschiedlichen Strömungsbedingungen im Messquerschnitt bessere Ergebnisse. Zum Zeitpunkt der Messungen stand das Tool jedoch leider noch nicht zur Verfügung, deshalb war die Notwendigkeit einer Schleifenfahrt damals nicht gegeben. Aus diesem Grund konnten die Messungen leider nicht damit ausgewertet werden.

Stattdessen wurden die Messwerte der Totalstation zur Berücksichtigung des korrekten Messpfads verwendet. Die Bearbeitung der Daten geschah allerdings erst im Nachgang der Messung. Dafür wurden die originalen Datenfiles in das ASCII-Format exportiert. Die Messsoftware *WinRiver* bietet die Möglichkeit eines derartigen Datenexports. Nachdem die ADCP-Messungen mit Referenz BT durchgeführt wurden, liegt ein Export der Daten mit dieser Einstellung nahe. Abbildung 5 zeigt jedoch, dass dies nicht immer die beste Lösung ist.

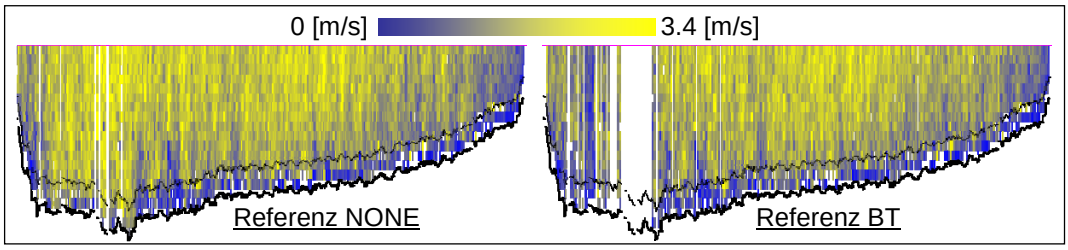


Abb. 5: Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Querschnitt (Referenz NONE / BT)

Die genauere Betrachtung einer einzelnen Messfahrt in *WinRiver* zeigt, dass je nach verwendeter Referenz (BT oder NONE) die Anzahl der zur Verfügung stehenden Daten stark variieren kann. Bei Referenz BT (rechtes Bild) ist die Datendichte um einiges geringer als bei Referenz NONE (linkes Bild). Dies liegt darin begründet, dass der ADCP – wie bereits beschrieben – bei der Berechnung der absoluten Fließgeschwindigkeiten auf zusätzliche Informationen des Kompasses und des BT-Signals angewiesen ist. Sind diese Informationen nicht vorhanden – beispielsweise, weil die ausgesendeten Messstrahlen aufgrund hoher Schwebstoffkonzentrationen nicht mehr zum Gerät zurück gelangen konnten, oder weil die empfangenen Daten nicht eindeutig interpretiert werden konnten – ist der ADCP nicht in der Lage, die erfassten Relativgeschwindigkeiten in Absolutwerte umzurechnen. Dies führt zu Lücken, so genannten Fehlensembles, in den Datensätzen. Betrachtet man hingegen die Messdaten mit der Referenz NONE, geht der ADCP auch bei der Erfassung der Fließgeschwindigkeiten davon aus, dass er selbst sich in Ruhe befindet. Das bedeutet, die erfassten Relativwerte sind identisch mit den Absolutgeschwindigkeiten, die BT-Daten müssen in diesem Fall nicht berücksichtigt werden, und alle erfassten Messwerte können abgespeichert und im Zuge des Datenexports in die ASCII-Files geschrieben werden.

3.2.2 Zusammenführung von ADCP- und Lagemessdaten

Während der Messung speicherte die Totalstation pro Messpunkt die jeweilige Uhrzeit im Format [hh:mm:ss], die schräge Distanz zum Prisma in [m], sowie den Winkel zur Vertikalen und den Horizontalwinkel zu einer beliebig wählbaren Nullrichtung in [rad] ab. Diese Informationen müssen vor der Implementierung in die ASCII-Dateien in geografische Koordinaten umgewandelt werden. Dies erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden die Rohdaten in Gauß-Krüger-Koordinaten umgerechnet. Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis der Koordinaten des Gerätestandorts sowie des Winkels zwischen dem festgelegten Horizontal-Nullwinkel und Norden. Im nächsten Schritt werden die Gauß-Krüger-Koordinaten in geografische Koordinaten umgerechnet. Danach können die Lageinformationen durch lineare Interpolation auf die Zeitstempel der ADCP-Messensembles bezogen werden.

Für die Zusammenführung der verschiedenen Datensätze benötigt man die ASCII-Dateien der ADCP-Messung mit Referenz NONE sowie die umgewandelten Lageinformationen der Totalstation. Möchte man die Textdateien mit den ADCP-Messwerten für spätere Auswertungen noch weiterverwenden, so darf der Aufbau dieser Dateien nicht verändert werden. Es können lediglich in den Datensätzen bereits vorhandene Informationen oder Platzhalter ersetzt werden. Wie bereits erwähnt, bietet *WinRiver* die Möglichkeit, GPS-Daten direkt in die ADCP-Dateien zu integrieren (WinRiver 2003). Aus diesem Grund sind in den ASCII-Dateien Platzhalter für die berechnete Bootsgeschwindigkeit in vektorieller Form sowie für die Lageangaben des jeweiligen Messensembles mit Referenz GPS vorgesehen. Diese Platzhalter werden verwendet, um die Lageinformationen der Totalstation in die Datensätze zu integrieren. Die abgespeicherten Messwerte in den einzelnen Tiefenzellen – wie beispielsweise Fließgeschwindigkeiten und Rückstreuintensitäten – müssen teilweise auch von Referenz NONE auf Referenz GPS umgerechnet werden, was dank der vektoriellen Schreibweise ganz einfach durch vektorielle Addition geschieht. Die in den ASCII-Dateien enthaltenen Informationen zu den mit *WinRiver* berechneten Abflussanteilen werden im Zuge einer Weiterverarbeitung nicht verwendet sondern neu berechnet, und können daher vernachlässigt werden. Nach der Zusammenführung der Daten des ADCP und der Totalstation können die ergänzten ASCII-Dateien beispielsweise in das Programm *AGILA* eingelesen werden, wo dann die endgültige Auswertung der Daten erfolgen kann.

3.2.3 Auswertung der Messdaten und Vergleich der Ergebnisse

Abbildung 6 zeigt – analog zu Abb. 4 – das aus den fünf Messfahrten gemittelte Geschwindigkeitsprofil sowie den daraus berechneten und gemittelten Abfluss bei Ergänzung der ADCP-Daten mit den Messwerten der Totalstation.

Wie bereits erwähnt, interpretiert *AGILA* die nachträglich hinzugefügten Lageinformationen der Totalstation als GPS-Werte, was aber keine Auswirkung auf die Ergebnisse hat. Aus den fünf Querungen wurde ein Abfluss von 149 m³/s ermittelt. Das Ergebnis weicht um 3,5 % vom ermittelten Abfluss am Pegel ab. Unter Berücksichtigung der Messbedingungen vor Ort ist die Genauigkeit überaus zufriedenstellend. Im Gegensatz zu den mit Referenz BT ermittelten Abflüssen (129, 119, 133, 129 bzw. 130 m³/s) weisen die unter Berücksichtigung der zusätzlich erfassten Lageinformationen ermittelten Abflüsse (148, 149, 150, 148 bzw. 148 m³/s) eine wesentlich geringere Streuung auf als die ursprünglichen Ergebnisse. Auch die korrigierten Fließgeschwindigkeiten stimmen mit den Ergebnissen der Flügelmessung jetzt sehr gut überein (Abb. 6).

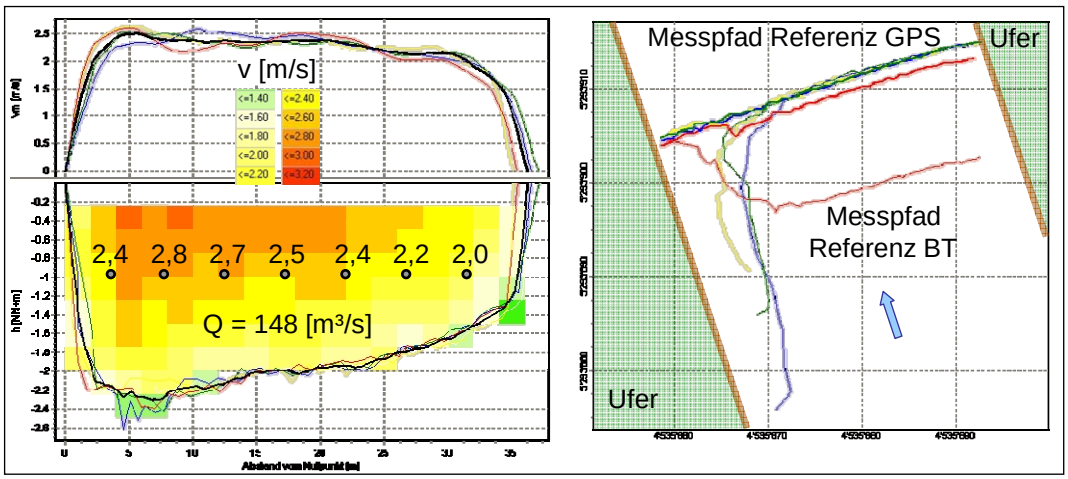


Abb. 6: Mittlere Fließgeschwindigkeitsverteilung im Messquerschnitt (links), mit der Totalstation ermittelte Messpfade (rechts)

3.3 Abschätzung morphologischer Prozesse

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Geschwindigkeitsinformationen dokumentiert der ADCP auch die Intensität der Rückstreusignale. Mit Hilfe dieser Daten können Rückschlüsse auf die während der Messung vorhandenen Schwebstoffkonzentrationen gemacht werden. Allerdings sind die Zusammenhänge sehr komplex und von einer Vielzahl von Parametern abhängig (AARDOOM 2005; DEINES 1999; GARTNER 2002). Neben geometrischen Ausbreitungs- und Dämpfungsphänomenen und gerätespezifischen Kennzahlen des ADCP haben auch die Eigenschaften des Wassers (Salzgehalt, Dichte, Viskosität), die Kornverteilung der Schwebstoffe sowie die Menge der in Schwebe befindlichen Partikel Einfluss auf die Beschaffenheit der reflektierten Signale. Nach Berücksichtigung aller bekannten, messbaren oder abschätzbaren Faktoren bleiben die beidem letztgenannten Größen als Unbekannte übrig. Aufgrund der meist fehlenden Informationen über die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe ist eine Auswertung der Daten ohne parallel durchgeführte, konventionelle Kalibrierungsmessungen nicht möglich. Es können lediglich qualitative Aussagen über mögliche Anstiege in den Konzentrationen während einer Messung oder über Bereiche mit höheren und Bereiche mit niedrigeren Konzentrationen gemacht werden.
Abbildung 7 veranschaulicht diese Problematik.

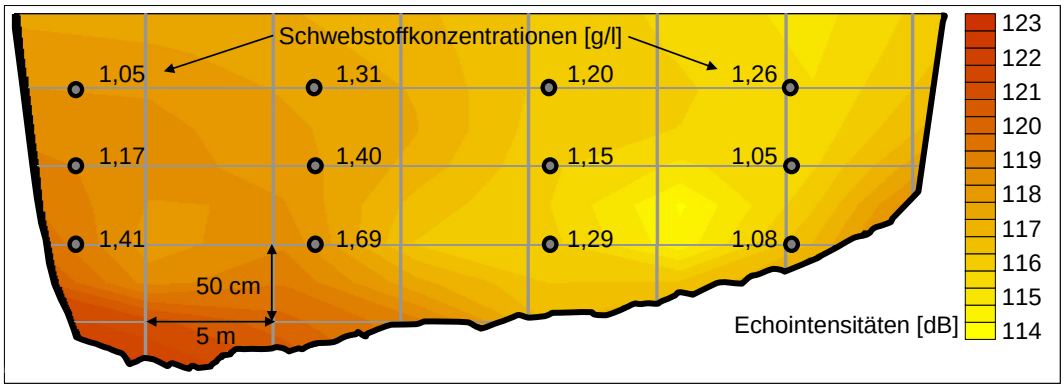


Abb. 7: Verteilung der Rückstreuintensitäten und gemessene Schwebstoffkonzentrationen

Vor der Durchführung der ADCP-Messungen am 08.08.2006 konnten von einer Brücke knapp oberhalb der Pegelstelle 15 Schwebstoffproben über den Querschnitt verteilt entnommen werden. Diese wurden mit der – aus den fünf ADCP-Überfahrten gemittelten – Verteilung der Echointensitäten verglichen. Diese Werte sind das Ergebnis einer in *WinRiver* integrierten Routine zur Berücksichtigung aller bekannten geometrischen, geräte- und wasserspezifischen Phänomene, die die Beschaffenheit der Echosignale beeinflussen. Obwohl die ADCP-Daten qualitativ gut mit den in den Querschnitt eingetragenen gemessenen Schwebstoffkonzentrationen übereinstimmen, konnte keine eindeutige Beziehung zwischen den beiden Datensätzen gefunden werden.

Auch die Erfassung der Größe des Geschiebetriebs im Messquerschnitt mit Hilfe von ADCP-Messungen ist noch nicht am Ende ihrer Entwicklung angelangt. Wie Abb. 6 eindrucksvoll zeigt, gibt der Vergleich der unter Verwendung des BT-Signals ermittelten Messwege mit den extern erfassten Lagedaten sehr deutlich Auskunft über Bereiche mit Sedimentbewegung an oder nahe der Sohle und Bereiche mit ruhender Sohle. Das Problem in diesem Zusammenhang ist die Gefahr, dass eventuell vorhandene, sohlnahe Schichten mit sehr hohen Schwebstoffkonzentrationen vom ADCP als Sohlenoberfläche interpretiert werden, was dazu führen würde, dass der Messpfad des ADCP bei Referenz BT durch die Geschwindigkeit der transportierten Sedimente anstatt des Geschiebes verfälscht wird, was etwaige Rückschlüsse auf die Geschiebebewegung nicht mehr möglich macht. Hier sind dementsprechende Modifikationen des BT-Signals notwenig, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erhalten. Umfangreiche Forschungen und Untersuchungen auf diesem Gebiet (RENNIE 2007) erlauben jedoch die Prognose, dass – analog zur Entwicklung auf dem Gebiet der Schwebstoffkonzenrationsmessung mit ADCP – Geräteeinstellungen für ADCP-Messungen zur Erfassung morphologischer Veränderungen der Sohle präzisiert bzw. standardisiert werden, die Durchführung anwenderfreundlicher gestaltet und die Auswertung der Messdaten durch die Entwicklung entsprechender Tools erleichtert werden wird.

4 Zusammenfassung

Es wurden ADCP-Messungen an einem voralpinen Gewässer bei hochwasserähnlichen Abflusssituationen durchgeführt. Die Messungen sollten die Anwendbarkeit der ADCP-Technik unter derartigen Bedingungen prüfen und die Möglichkeit einer Datenauswertung im Hinblick auf morphologische Prozesse im Messquerschnitt untersuchen.

Der geräteintern ermittelte Messpfad wurde durch Geschiebetrieb stark verfälscht, was zu einer Unterschätzung der Fließgeschwindigkeiten und in weiterer Folge des Abflusses führte. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die nachträgliche Implementierung von extern erfassten Lageinformationen – in diesem Fall die Messwerte einer Totalstation –eine zielführende Alternative zur Verwendung von GPS-Daten darstellt, um korrekte Abflussdaten zu erhalten. Die zusammengeführten Datensätze können mit Auswerteprogrammen, wie beispielsweise *AGILA*, eingelesen und weiter bearbeitet werden. Die so ermittelten Abflussdaten an der Tiroler Achen wiesen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Pegeldaten auf.

Anhand der vom ADCP aufgezeichneten Rückstreuintensitäten können zwar qualitative Aussagen über die Verteilung von Schwebstoffkonzentrationen im Querschnitt oder die zeitliche

Veränderung während der Messungen getroffen werden, quantitative Aussagen sind aber nur möglich, wenn zusätzliche Schwebstoffkonzentrationsmessungen zur Eichung der Echointensitäten nicht nur von der Konzentration, sondern auch von der Kornverteilung der Schwebstoffe abhängig sind. Somit liegt ein Problem mit zwei Unbekannten vor, dass zusätzliche Informationen – in diesem Fall zusätzliche Messungen – zur Lösung erfordert. Auch die Auswertung der ADCP-Daten in Hinblick auf mögliche Aussagen über das Ausmaß der Geschiebebewegung im Querschnitt ist noch Inhalt von detaillierten Parameterstudien. Hier liegen die Herausforderungen in der möglichst exakten, zuverlässigen Erfassung des ADCP-Wegs durch externe Messgeräte, sowie in der eindeutigen Identifikation der Sohlenoberfläche durch den ADCP, um mögliche Verwechslungen mit sohlnahen Schwebstoffschichten ausschließen zu können.

Literatur

AARDOOM, J. H. UND MOL, J.-W.: Quantification of sediment concentrations and fluxes from ADCP measurements, Akustische Dopplergeräte (ADCPs) in der Hydrometrie: Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 12.05, S. 117–130, 2005

ADLER, M. UND NICODEMUS, U.: Benutzerhandbuch AGILA 6, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2007

DEINES, K. L.: Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, Oceans 99 MTS / IEEE Conference Proceedings, 1999

GARTNER, J. W.: Estimation of Suspended Solids Concentrations Based on Acoustic Backscatter Intensity: Theoretical Background, Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, 2002

MUELLER, D. S. UND WAGNER, C. R.: Correcting Acoustic Doppler Current Profiler Discharge Measurements Biased by Sediment Transport, Journal of Hydraulic Engineering, 133(12), S. 1329–1336, 2007

RENNIE, C. D.; RAINVILLE, F. UND KASHYAP, S.: Improved Estimation of ADCP Apparent Bed-Load Velocity Using a Real-Time Kalman Filter, Journal of Hydraulic Engineering, 133(12), S. 1337–1344, 2007

WinRiver: WinRiver I User's Guide – International Version, RD Instruments, 2003

Kontakt:
Dipl.-Ing. Katharina Fiedler
Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80333 München
Tel.: 089/ 289 23167
Fax: 089/ 289 23172
k.fiedler@bv.tum.de

1995 – 2002
Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck (Österreich)

seit 2002
Wissenschaftliche Angestellte am Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München

Projektbearbeitung:

2006 – 2007	operatives Entwicklungsvorhaben: Ermittlung des Abflusses an Pegeln mit bewegter Sohle
2005 – 2006	Erfassung von Geschwindigkeitsprofilen und variablen Sohlenlagen mit dem ADCP
2005	Abschätzung tausendjährlicher Abflüsse am bayerischen Inn
2004	Eindimensionale Simulation von Hochwasserereignissen

Software TIDE – Analyse von ADCP-Messungen in Tideflüssen

Matthias Adler und Uwe Nicodemus

1 Einleitung

Die Kenntnis der Strömungs- und Durchflussverhältnisse in einem Querschnitt eines Tideästuars ist für viele Belange der Gewässerkunde, des Strombaus, der Gewässerunterhaltung sowie für die Schifffahrt von Interesse.

Da sich die Strömungsverteilung im Messquerschnitt im Verlauf von Ebbe und Flut permanent ändert, sind Durchflussmessungen in Tideflüssen sehr aufwändig. Eine bewährte Methode besteht darin, mit ortsfesten Strömungsmessgeräten zu arbeiten. Dazu werden an ausgewählten Positionen Messstränge ausgebracht, die mit Dauermessgeräten bestückt sind (Abb. 1).

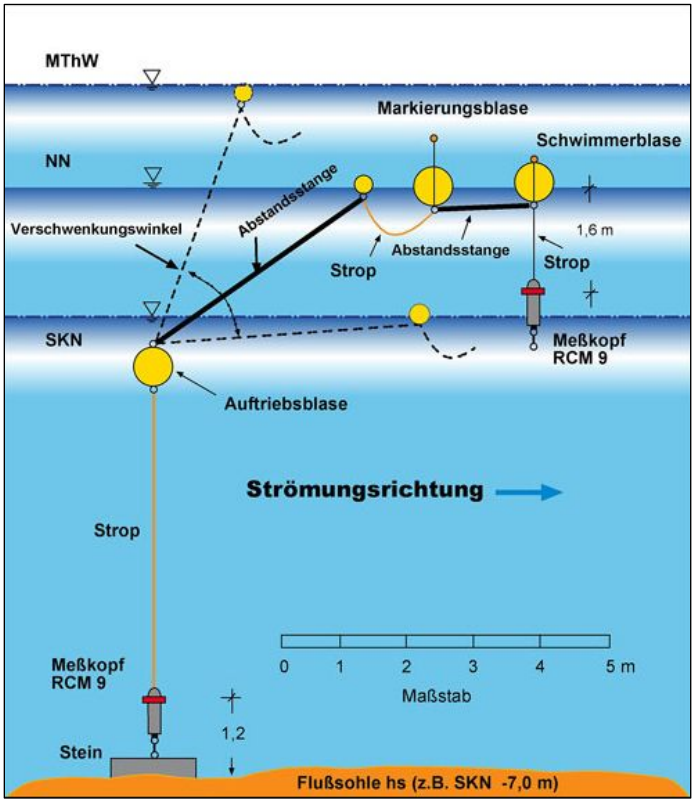


Abb. 1:
Anordnung eines Messstrangs mit einem wasserspiegelnahen und einem sohlnahen Dauermessgerät (WSA Emden)

Heute werden dafür meist punktuell messende Ultraschall-Doppler-Geräte eingesetzt (z. B. RCM 9 LW/Seaguard RCM der Fa. Aanderaa Data Instruments). Der Gerätebedarf sowie der Aufwand für die Vorbereitung und Auswertung der Messung ist bei diesem klassischen Verfahren relativ hoch. Dieses ist unter anderem im „Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Querschnittsmessungen“ (MÜLLER 1989) des WSA Bremerhaven beschrieben.

Je nach Fragestellung und örtlichen Randbedingungen kann es heute effektiver sein, mit einem ADCP-Schiff nach der Moving Boat Methode zu messen. Das Messboot überquert dabei den Tidefluss auf dem ausgewählten Profil und ermittelt kontinuierlich

> die Wassertiefe,
> das Strömungsprofil und
> die Fahrtgeschwindigkeit.

Im Verlauf einer Tidemessung, die ca. 13 Stunden dauert, fährt das Schiff das Profil permanent ab. Um mit der anfallenden Datenflut fertig zu werden, wurde die Software TIDE entwickelt. Die Messdaten werden visualisiert und zu Ganglinien des Wasserstandes, des Durchflusses, der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit und Hauptströmungsrichtung verdichtet.

2 Auswertung und Visualisierung der ADCP-Messdaten

Eine Eintidenmessung beginnt im Allgemeinen vor Einsetzen des Flutstroms und dauert mehr als 13 Stunden. Während dieser Zeit fährt das ADCP-Boot das Profil kontinuierlich ab und misst so die Änderungen der Strömungsverhältnisse im Verlauf der Tide. Für jede Messfahrt wird mit WinRiver, dem ADCP-Erfassungs- und Auswerteprogramm des Geräteherstellers eine eigene Datei angelegt, in der die Strömungsverhältnisse, das Tiefenprofil, der Durchfluss und Navigationsdaten gespeichert sind.

Mit der Software TIDE wird eine komplette Tidemessung, ein Projekt, das sich aus einer Serie von Messfahrten zusammensetzt, ausgewertet und visualisiert. In fünf Programmfenstern werden Messdaten und Auswertungsergebnisse grafisch und in Textform dargestellt (Abb. 2).

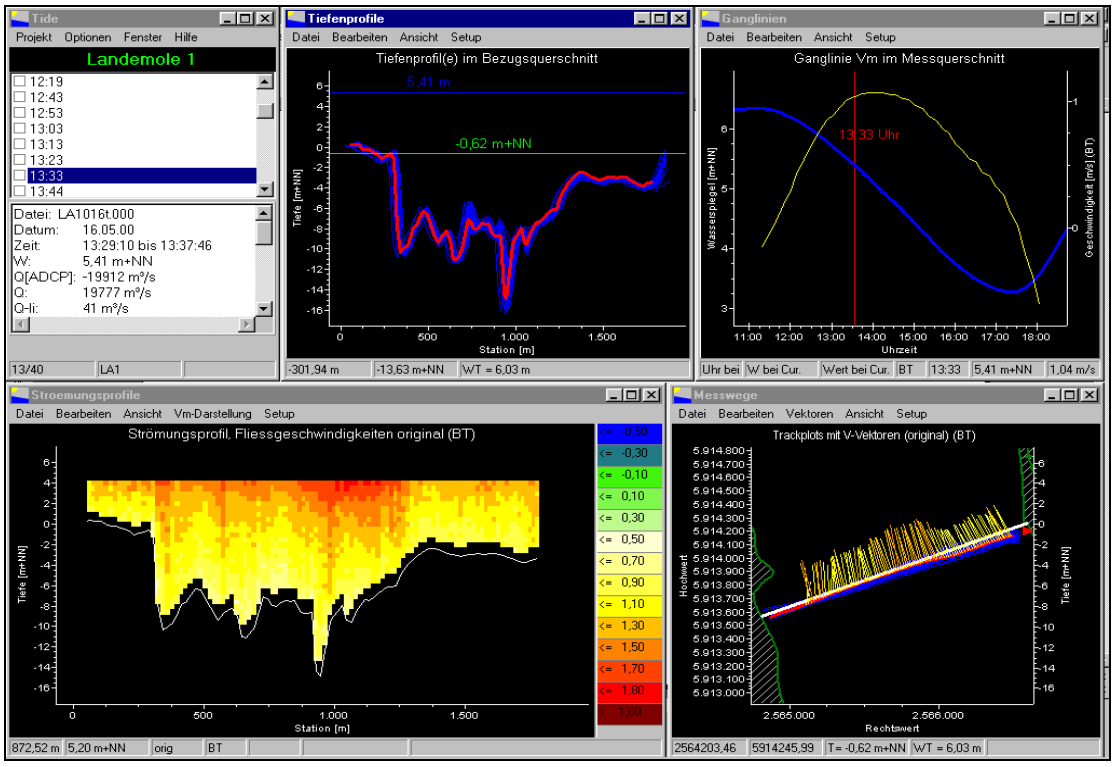


Abb. 2: Fünf Hauptfenster in Software TIDE

Im Einzelnen sind folgende Berechnungen und Darstellungen implementiert:

> Tiefenprofile
> Querprofile aus externen Quellen (Peilungen) zusammen mit den Tiefenprofilen
> Wege des Schiffes während der Messfahrten (Abb. 3)
> Kartendaten, mit denen die Messfahrten in ihrer Umgebung gezeigt werden können
> Strömungsprofile im Messquerschnitt (originale oder projizierte Fließgeschwindigkeiten und auch Vertikalgeschwindigkeiten) (Abb. 4)
> Profile der Echointensitäten im Messquerschnitt
> Strömungsvektoren tiefengemittelt (Abb. 3) oder in bestimmten Tiefen in der Draufsicht sowie Strömungsvektoren im Messquerschnitt (Abb. 5)
> Ganglinien des Wasserstandes, des Durchflusses, der mittleren Querschnittsgeschwindigkeit, der Hauptströmungsrichtung und der mittleren Echointensitäten (Maß für Schwebstoffkonzentrationen) (Abb. 6)
> Ganglinien der Fließgeschwindigkeit und des Abflusses aus Messungen mit anderen Messgeräten in Bereichen außerhalb des Messquerschnitts

Weitere Eigenschaften:

> Höhen- bzw. Tiefeninformationen aus den Messdaten werden vor der Visualisierung mit Wasserstandswerten beschickt, um für alle Messfahrten einen einheitlichen Bezug auf Normalnull (m+NN) zu gewährleisten.
> Projektion der Strömungsvektoren in die Ebene des Sollprofils
> Ermittlung der Kenterpunkte und Durchfluss-Summenlinien (Flut- und Ebbestromvolumina)
> Teilen eines Querschnitts in Unterabschnitte
> Um verschiedene Messungen eines Querschnitts besser vergleichen zu können, kann eine Matrix aus Zellen mit fester Position und Größe festgelegt werden.
> Ganglinien der Matrixzellen berechnen und darstellen
> Es stehen Funktionen zum Korrigieren von fehlerhaften Messdaten zur Verfügung.

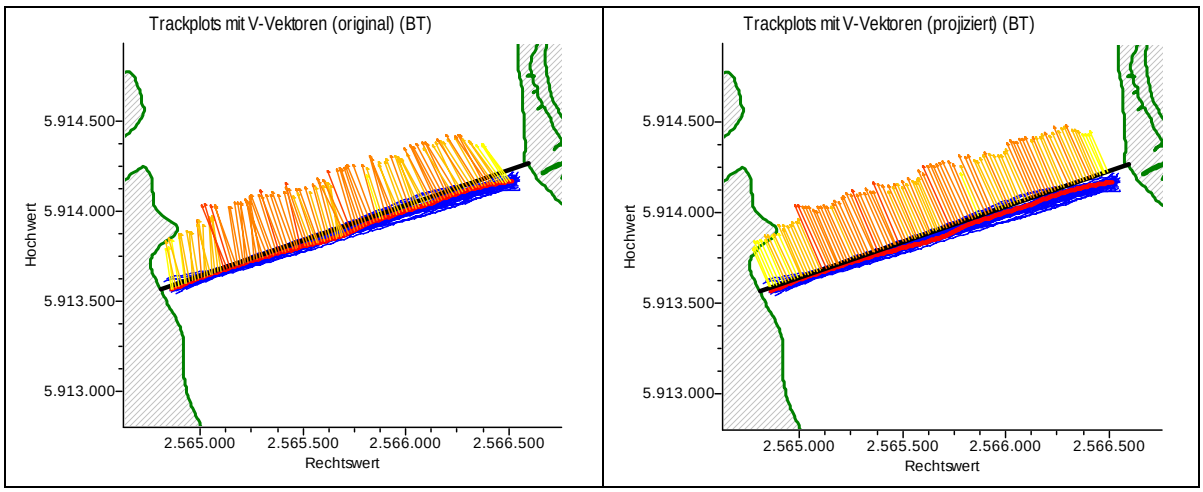


Abb. 3: Draufsicht auf das Messgebiet mit Darstellung der Messfahrten (Trackplots) und Strömungsvektoren

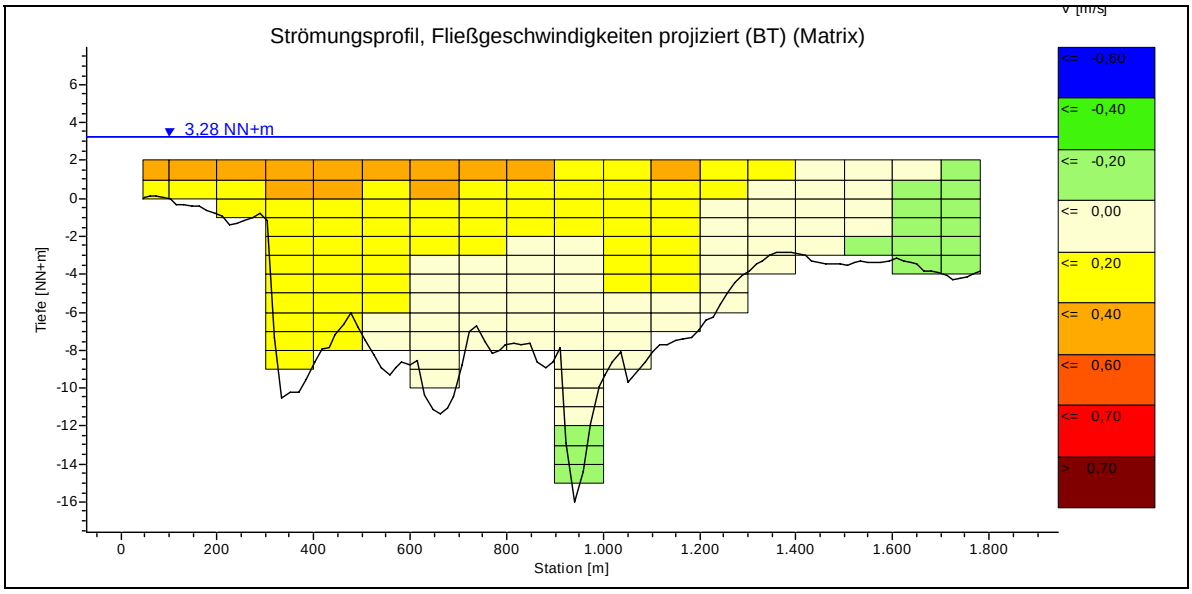


Abb. 4: Strömungsprofil, Messzellen in einem Raster (Matrix) gemittelt

3 Ausblick

ADCP-Messungen nach der Moving Boat Methode liefern mit relativ geringem Aufwand Durchfluss- und Strömungsdaten einer Tidemessung. Messtechnische Schwierigkeiten, wie sie bei ungünstigen Verhältnissen an der Gewässersohle auftreten können, lassen sich durch den Einsatz von GPS und Echolot lösen. Eine sinnvolle Erweiterung von Software TIDE wäre die Darstellung von Schwebstoffverteilungen und die Berechnung von Schwebstofffrachten im Kontext der anderen hydraulischen Auswertungsergebnisse. Mit der Plume Detection Toolbox, PDT, der niederländischen Firma Aqua Vision steht das Verfahren bereit, um aus den Echointensitäten der Ultraschall-Rückstreusignale Schwebstoffkonzentrationen zu ermitteln. Hier gilt es, eine praktikable Schnittstelle zwischen Software TIDE und der PDT zu entwickeln.

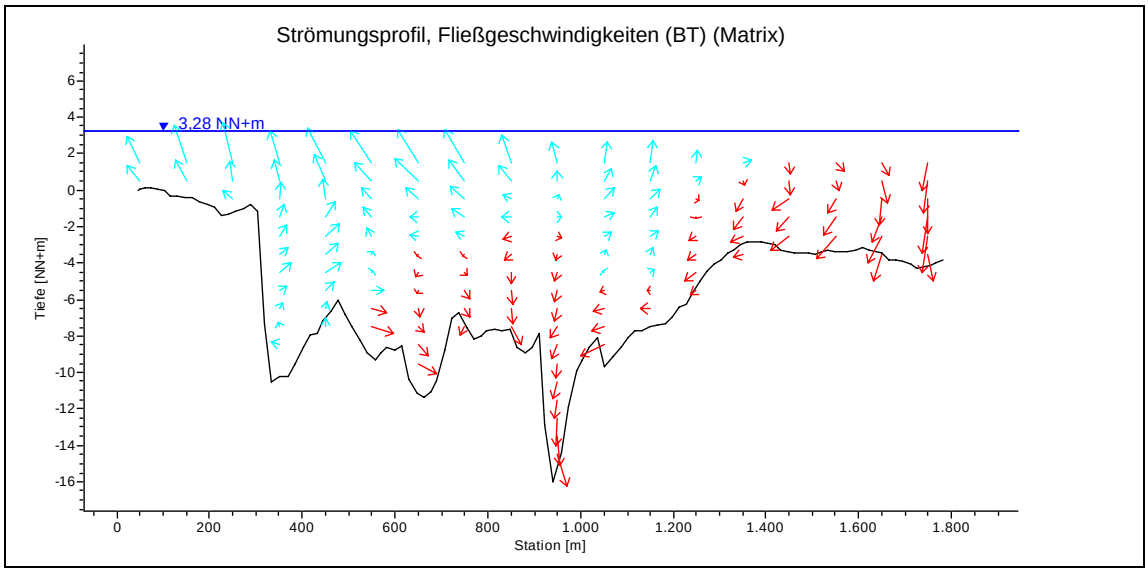


Abb. 5: Vektorielle Darstellung des Strömungsprofils

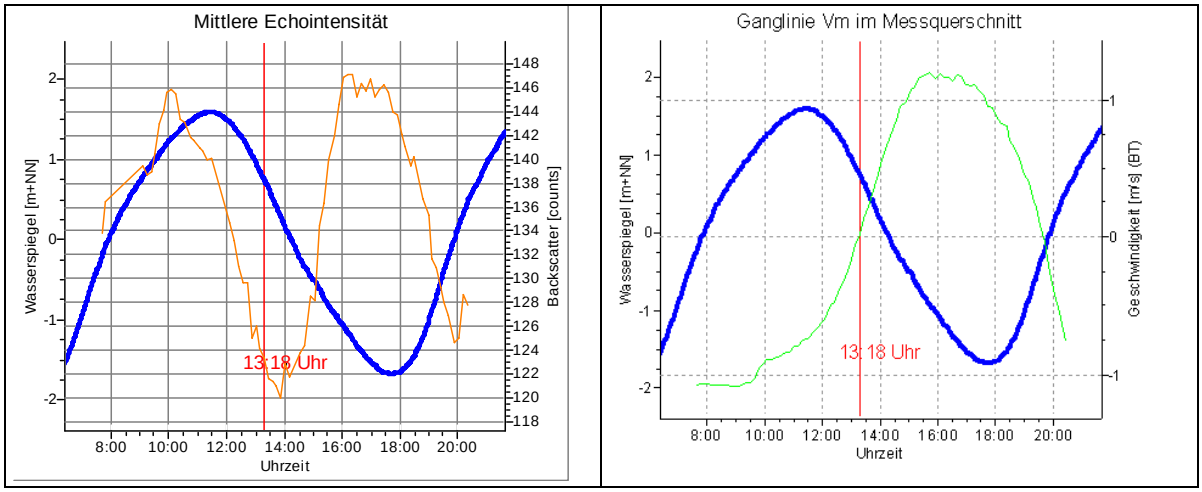


Abb. 6: Darstellung von Ganglinien des Wasserstandes und verschiedener Parameter wie Durchfluss, mittlerer Fließgeschwindigkeit und Echointensität

Literatur

ADLER, M. UND FRITSCH, R.: Test von Strömungsmessgeräten ohne bewegliche Teile für den Dauereinsatz in Tidegewässern, Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-Bericht Nr. 1229, 1999

Pegelvorschrift, Anlage D: Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen, Anhang I, Ergänzungen für das Küstengebiet, 1995

MÜLLER, H.: Ein Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Querschnittsmessungen, Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven, Gewässerkundlicher Untersuchungsbericht, Ein Leitfaden für die Planung, Durchführung und Auswertung von Querschnittsmessungen, Oktober 1989

AQUA VISION BV, Plume Detection Toolbox, PDT

Jahrgang 1956

1975 – 1983
Studium Bauingenieurwesen an der TH Darmstadt und der TU Berlin

1983 – 1988
Wasserbauingenieur bei "Salzgitter Consult GmbH“

seit 1988
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat M1,
Hydrometrie und Gewässerkundliche Begutachtung

Kontakt:
Dipl.-Ing. Matthias Adler
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56002 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306-5247
Fax: 0261/ 1306-5280
adler@bafg.de

Jahrgang: 1960

1983 – 1987
Studium des Baugenieurwesens an der Fachhochschule Koblenz

seit 1987
Bundesanstalt für Gewässerkunde,
hier seit 1998 im Referat M1,
Hydrometrie und Gewässerkundliche Begutachtung

Kontakt:
Dipl.-Ing. (FH) Uwe Nicodemus
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
56068 Koblenz
Tel.: 0261/ 1306-5266
Fax: 0261/ 1306-5363
nicodemus@bafg.de

In der Reihe BfG-Veranstaltungen sind bisher u.a. erschienen:

1/**2001**	Abflussverhältnisse im Rheingebiet. – Ansätze, Instrumentarien und Ergebnisse aus ausgewählten Projekten
2/2001	Verfahren zur Bewertung von Alternativen beim Ausbau von Bundeswasserstraßen
3/2001	Feststoffeintrag, Laufentwicklung und Transportprozesse in schiffbaren Flüssen
4/2001	Sedimentuntersuchungen in Ostseeküstengewässern und Schlussfolgerungen für Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen in der WSV
5/2001	Die EU-Wasserrahmenrichtlinie. Ansätze und Perspektiven einer ökologischen Bewertung des Makrozoobenthos in Übergangs- und Küstengewässern
1/**2002**	Abbau von Tributylzinn (TBT) in Sedimenten
2/2002	Neuartige toxische Effekte und ihre Relevanz für die Baggergutbeurteilung
3/2002	Rechtliche Vorgaben für den Umgang mit Baggergut – Aktuelle Entwicklungen
4/2002	Einsatz ökologischer Modellsysteme zur Unterstützung von Entscheidungen bei Eingriffen in Fließgewässern
1/**2003**	Modellgestützte Wasserbewirtschaftung mit hoher zeitlicher Auflösung
2/2003	Moderne Strategien zur Qualitätssicherung in der Gewässervermessung
3/2003	Schwebstoffe und Schwebstofftransport in Binnenwasserstraßen
4/2003	Staugeregelte Flüsse in Deutschland, wasserwirtschaftliche und ökologische Zusammenhänge (Impounded Rivers in Germany, Water Management and Ecological Interactions)
5/2003	Vorkommen und Analytik ausgewählter Schadstoffklassen der EU-Wasserrahmenrichtlinie
6/2003	Zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie bei Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen von Wasserstraßen und Häfen
7/2003	Fluss und Wasserstraße – morphodynamische Charakteristik und zukünftige Entwicklung
8/2003	SENSPOL Technical Meeting on Problems related to Diffuse Pollution Sources: Characterization of Sediment, Dredged Material and Groundwater
9/2003	Anwendung umweltrelevanter Vorgaben für die WSV beim Umgang mit Baggergut im Küstenbereich, Aktuelle Entwicklungen
1/**2004**	Flussgebietsbewirtschaftung – quo vadis Modellierung
2/2004	Auswirkungen des Ausbaus deutscher Nordsee-Ästuare auf die Gewässergüte und das Baggergutmanagement
3/2004	Die Lahn, Betrachtungen zu einem Gewässer aus hydrologischer, wasserwirtschaftlicher und ökologischer Sicht
4/2004	Tracer- und Abriebversuche – Gewinnung morphologischer Basisdaten für die Bewirtschaftung defizitärer Flusssysteme
5/2004	Statusseminar – Sedimentkontakttests
6/2004	Wasserstands- und Abflussvorhersage in grenzüberschreitenden Flussgebieten. Stand und Weiterentwicklung von Vorhersagesystemen
1/**2005**	Praxisorientierte und vielseitig nutzbare Fernerkundungseinsätze an der Elbe
2/2005	Die Bedeutung von Baggergutrichtlinien für das Sedimentmanagement in Flussgebieten und für den Meeresschutz
3/2005	Anwendungen der weltweiten Sammlung von Abflussdaten des Global Runoff Data Centre (GRDC)
4/2005	Feststoffhaushalt und Sedimentbewirtschaftung – anthropogene Steuerung natürlicher Prozesse
5/2005	Erfahrungen zur Niedrigwasserbewirtschaftung
1/**2006**	Gewässerkundliche Untersuchungen für verkehrliche und wasserwirtschaftliche Planungen an Bundeswasserstraßen
2/2006	Wasserstands- und Abflussvorhersagen im Elbegebiet
3/2006	Niederschlag-Abfluss-Modellierung zur Verlängerung des Vorhersagezeitraumes operationeller Wasserstands- und Abflussvorhersagen
4/2006	Radiologische Untersuchungen an Bundeswasserstraßen als Teil der radiologischen Umweltüberwachung
5/2006	Messkonzepte und Modellierung in der Gewässermorphologie
1/**2007**	Höhenmessungen mit GPS – Status quo und Entwicklungstendenzen
2/2007	Röhricht an Bundeswasserstraßen (im norddeutschen Raum)
1/**2008**	Neue Wege der Schadstoffbekämpfung